





***ПОБЕДИТЕЛЬ***  
**Всероссийского конкурса**  
**рукописей учебной,**  
**научно-технической**  
**и справочной литературы**  
**по энергетике 2017 года**

---

*Книга издана  
при поддержке  
Публичного акционерного общества  
«Российские сети»*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И МОЛНИЕЗАЩИТА В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Рекомендовано Федеральным учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования по укрупненным группам специальностей  
и направлений подготовки 13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика»  
в качестве учебного пособия для реализации основных образовательных программ  
высшего образования по направлению подготовки  
«Электроэнергетика и электротехника»

3-е издание, переработанное и дополненное

Под общей редакцией заслуженного деятеля науки Российской Федерации  
доктора технических наук, профессора Б.К. Максимова

Москва  
Издательство МЭИ  
2018

УДК 537.8:621316.98: 621.3 (075.8)  
ББК 22.313 + 31.247.5 + 31.2Я73  
Э455

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Жуков В.В.;  
канд. техн. наук, доцент Арцишевский Я.Л.

**Авторы: А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов, А.В. Жуков,  
И.П. Кужекин, А.Г. Темников**

Э 455 Электромагнитная совместимость и молниезащита в современной электроэнергетике: учебн. пособие / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др.; под ред. Б.К. Максимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 688 с.

ISBN 978-5-7046-1994-9

В учебном пособии системно изложены актуальные проблемы электромагнитной совместимости и молниезащиты. Рассмотрены источники перенапряжений и помех, каналы их передачи и приемники, вызванные молнией, переходными процессами при плановых коммутациях и аварийных режимах на предприятиях электроэнергетики. Проанализирована электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики и показано, что при определенных условиях на них наблюдаются превышения нормированных уровней перенапряжений и помех, что является причиной снижения надежности электропередачи и электроснабжения. Систематизированы данные о зонной концепции ограничения перенапряжений и помех, а также о защитных устройствах, предназначенных для этих целей.

Рассмотрены актуальные вопросы биологического и техногенного влияния электромагнитных полей, обеспечения электромагнитной совместимости технических средств (качества электроэнергии) в узлах нагрузки энергосистемы, а также новейшие российские и зарубежные нормативные документы по электромагнитной совместимости объектов электроэнергетики.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», преподавателей, аспирантов и инженерно-технических работников, для системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации персонала энергетических компаний.

**УДК 537.8:621316.98: 621.3 (075.8)  
ББК 22.313 + 31.247.5 + 31.2Я73**

ISBN 978-5-7046-1994-9

© Коллектив авторов, 2018  
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2018  
© ПАО «Россети», 2018

# Оглавление

Предисловие.....	13
Основные термины и определения.....	15
Список сокращений.....	22
<b>Глава 1. Источники электромагнитных воздействий.....</b>	<b>26</b>
1.1. Общие положения.....	26
1.2. Переходные процессы при ударах молнии.....	32
1.2.1. Электромагнитное поле тока молнии при ударе в землю.....	33
1.2.2. Прямые удары молнии в линии электропередачи и другие элементы электроустановок.....	33
1.2.3. Воздействие электромагнитного поля молнии на линии электропередачи или сооружения.....	38
1.2.4. Стандартизированные параметры тока молнии.....	38
1.3. Коммутационные процессы в цепях высокого напряжения.....	42
1.4. Электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций.....	49
1.5. Радиочастотные поля.....	54
1.6. Электромагнитный импульс ядерного взрыва.....	56
1.7. Разряды статического электричества.....	58
1.8. Электромагнитные помехи, вызванные магнитным полем Земли.....	62
<i>Вопросы для самопроверки.....</i>	<i>65</i>
<b>Глава 2. Каналы передачи электромагнитных помех и способы их ослабления.....</b>	<b>67</b>
2.1. Моделирование механизмов связи.....	67
2.2. Упрощенные модели передачи электромагнитных помех и методы их снижения.....	68
2.3. Связь через общее полное сопротивление.....	70
2.4. Магнитная связь.....	72
2.5. Емкостная связь.....	85
2.6. Связь излучением.....	87
<i>Вопросы для самопроверки.....</i>	<i>89</i>
<b>Глава 3. Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики.....</b>	<b>91</b>
3.1. Классификация электромагнитной обстановки и степени жесткости испытаний на помехоустойчивость.....	91
3.2. Нормированные и действительные уровни помех на объектах энергетики.....	96

3.3. Электромагнитная обстановка на атомных электростанциях .....	104
3.4. Схемы цепей оперативного тока и электромагнитная совместимость .....	128
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	141
<b>Глава 4. Зонная концепция ограничения перенапряжений и помех</b> .....	142
4.1. Основные положения зонной концепции .....	142
4.2. Уравнивание потенциалов .....	157
4.3. Мероприятия по ограничению уровня помех .....	169
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	184
<b>Глава 5. Типовые схемы сетей электроснабжения и размещение в них защитных устройств</b> .....	185
5.1. Схемы сетей электроснабжения и электрические воздействия на них .....	185
5.2. Схемы защит сетей от перенапряжений .....	200
5.3. Элементы для уравнивания потенциалов и ограничения перенапряжений .....	208
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	218
<b>Глава 6. Обеспечение электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики</b> .....	219
6.1. Общие вопросы обеспечения ЭМС .....	219
6.2. Нормированная электромагнитная обстановка в зданиях и сооружениях, ее обеспечение .....	222
6.3. Размещение приборов и координация параметров защитных устройств .....	231
6.4. Особенности использования варисторов для ограничения перенапряжений .....	241
6.5. Обеспечение электромагнитной совместимости внутри зон .....	244
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	248
<b>Глава 7. Помехи в кабелях при воздействии электромагнитного поля</b> .....	249
7.1. Методические основы расчета электромагнитного воздействия .....	249
7.2. Взаимодействие электромагнитной волны с почвой .....	251
7.3. Подвесные кабели .....	256
7.3.1. Формулы для расчета линии передачи .....	257
7.3.2. Напряжение и ток в линии .....	263
7.4. Подземные кабели .....	264
7.5. Влияние электромагнитного поля, проникающего через экраны кабелей .....	269
7.5.1. Эквивалентная схема экранированных кабелей .....	269
7.5.2. Трубочатые экраны .....	271
7.5.3. Оплеточные экраны .....	275
7.5.4. Внутренние напряжения и токи .....	279
7.5.5. Измерение параметров экранирования .....	281
7.5.6. Многослойные экраны .....	283
7.5.7. Заземление экранов кабелей .....	285
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	292

<b>Глава 8. Экраны</b> .....	293
8.1. Дифференциальные уравнения Максвелла. Эквивалентная глубина проникновения поля.....	293
8.2. Экраны во внешнем магнитном поле.....	296
8.2.1. Экран из двух параллельных пластин.....	296
8.2.2. Цилиндрический экран в продольном поле.....	300
8.2.3. Цилиндрический экран в поперечном поле.....	300
8.2.4. Тонкостенный сферический экран .....	304
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	308
<b>Глава 9. Молния и молниезащита</b> .....	309
9.1. Общая характеристика грозовой деятельности .....	309
9.2. Грозовые облака и их характеристики.....	311
9.3. Возникновение и развитие молнии .....	314
9.4. Виды молний и параметры тока .....	316
9.5. Защита от прямых ударов молнии.....	327
9.6. Поражаемость воздушных линий электропередачи молнией .....	333
9.7. Исследование физики молнии и молниезащиты с помощью искусственных заряженных аэрозольных облаков .....	336
9.8. Рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК) по молниезащите зданий и сооружений .....	342
9.9. Вторичные воздействия молнии.....	362
9.9.1. Виды вторичных воздействий молнии.....	362
9.9.2. Аварии и технологические нарушения из-за вторичных воздействий молнии.....	364
9.9.3. Расчет вторичных воздействий молнии на энергообъектах.....	367
9.9.3.1. Расчет распределения тока и напряжения по заземляющему устройству при ударе молнии в молниеотвод .....	367
9.9.3.2. Расчет наведенных перенапряжений во вторичных цепях.....	370
9.9.3.3. Нормируемые параметры вторичных воздействий молнии .....	375
9.9.4. Экспериментальные методы определения характеристик молниезащиты.....	377
9.9.4.1. Имитация молнии с помощью сильноточных импульсных генераторов .....	377
9.9.4.2. Имитация молнии с помощью слаботочных импульсных генераторов .....	378
9.9.4.3. Имитация молнии с помощью вертикально расположенного проводника .....	378
9.9.5. Результаты обследования молниезащиты энергообъектов.....	383
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	386

<b>Глава 10. Практические способы снижения помех на электрических станциях и подстанциях</b> .....	387
10.1. Общие положения.....	387
10.2. Основные концепции выполнения заземления и прокладки кабелей.....	391
10.2.1. Правила выполнения заземления и прокладки кабелей.....	391
10.2.2. Применение параллельных заземленных проводников.....	394
10.3. Рекомендации по выполнению заземлений на ПС высокого напряжения.....	397
10.3.1. Порядок выполнения заземления.....	397
10.3.2. Цепи вторичной коммутации.....	400
10.3.3. Экранирование зданий.....	405
10.3.4. Подстанции с элегазовой изоляцией.....	406
10.3.5. Помехозаграждение.....	407
10.4. Рекомендации по выполнению заземлений на электростанциях.....	418
10.4.1. Способы выполнения заземления.....	418
10.4.2. Прокладка кабелей.....	424
10.5. Особенности ЭМС на ПС высокого напряжения.....	426
10.5.1. Воздействия, вызываемые коммутациями, пробоями изоляции или перекрытиями в цепях высокого напряжения.....	426
10.5.2. Помехи, создаваемые полями промышленной частоты.....	448
10.5.3. Помехи, создаваемые токами КЗ.....	429
10.5.4. Помехи, вызываемые воздействием молнии.....	431
10.5.5. Быстрые (электрические) переходные процессы, вызванные коммутациями в цепях низкого напряжения.....	437
10.5.6. Разряды статического электричества.....	438
10.5.7. Возмущения, создаваемые радиопередающими устройствами.....	438
10.6. Природа возникновения и уровни помех на электрических станциях.....	438
10.6.1. Основные причины и источники возникновения помех.....	438
10.6.2. Другие источники воздействий.....	441
10.6.3. Уровни испытательных воздействий на оборудование ЭС и ПС.....	442
10.7. Некоторые особенности проектирования заземляющих систем комплектных КРУЭ.....	444
10.7.1. Общие положения.....	444
10.7.2. Проектирование заземляющих систем КРУЭ.....	445
10.7.3. Оценка влияния переходного потенциала корпуса.....	450
10.7.4. Пробой снаружи КРУЭ.....	454
10.7.5. Критичность начального броска напряжения.....	454
10.7.6. Испытания и обслуживание заземляющих установок КРУЭ.....	454
10.8. Ограничения коммутационных электромагнитных помех в цепях управления с индуктивными элементами.....	455
10.8.1. Физические процессы при коммутациях в индуктивных цепях.....	456
10.8.2. Критерии оценки схем защиты от помех.....	459

10.8.3. Схемы защиты от помех для устройств постоянного тока.....	460
10.8.4 Схемы защиты от помех для устройств переменного тока.....	467
10.8.5. Схемы защиты от помех для трехфазных установок.....	472
10.8.6. Схемы защиты от помех для люминесцентных ламп.....	473
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	475
<b>Глава 11. Экологическое и техногенное влияние электрических и магнитных полей воздушных линий и подстанций ВН и СВН и возможности снижения их влияния на окружающую среду</b> .....	476
11.1. Экологические аспекты электромагнитной совместимости.....	477
11.1.1. Роль электрических процессов в функционировании живых организмов.....	477
11.1.2. Электромагнитная обстановка на объектах ВН и СВН и в быту.....	480
11.1.3. Механизмы воздействия электрических и магнитных полей на живые организмы .....	486
11.2. Нормирование безопасных для человека напряженностей электрических и магнитных полей.....	491
11.2.1. Нормативная база за рубежом и в РФ .....	491
11.2.2. Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН.....	493
11.3. Анализ электрических и магнитных полей воздушных линий СВН, проходящих в населенных районах.....	496
11.3.1. Напряженность электрического поля от ВЛ 500 кВ .....	496
11.3.2. Индуцированные ВЛ 500 кВ напряжения и токи.....	499
11.3.3. Вырубка леса и ограничение на использование земель в зоне ВЛ 500 кВ.....	501
11.3.4. Индукция магнитного поля от ВЛ 500 кВ .....	502
11.3.5. Ограничение напряженности электрического поля ВЛ 500 кВ тросовыми экранами .....	503
11.3.6. Ограничение напряженности магнитного поля ВЛ 500 кВ контурными экранами.....	508
11.3.7. Параллельное использование тросовых и контурных экранов .....	512
11.3.8. Роль растительных массивов в ограничении электрического поля ВЛ 500 кВ .....	516
11.4. Экологическое влияние коронного разряда.....	517
11.4.1. Радиопомехи .....	517
11.4.2. Акустический шум.....	519
11.4.3. Нормативная база на радиопомехи и акустические шумы .....	519
11.5. Влияния линий электропередачи на линии связи .....	525
11.5.1. Опасные влияния.....	525
11.5.2. Мешающие влияния.....	527
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	528

<b>Глава 12. Электромагнитная совместимость технических средств в узлах нагрузки электрических сетей ВН</b> .....	530
12.1. Общие положения.....	530
12.2. Статический преобразователь как источник гармоник и другие источники гармоник.....	531
12.3. Влияние гармоник на системы электроснабжения.....	533
12.3.1. Элементы систем электроснабжения.....	533
12.3.2. Вращающиеся машины.....	535
12.3.3. Статическое оборудование.....	537
12.3.4. Системы дистанционного управления токами тональной частоты.....	538
12.3.5. Устройства релейной защиты в энергосистемах.....	539
12.3.6. Оборудование потребителей.....	540
12.3.7. Влияние гармоник на измерение мощности и энергии.....	541
12.3.8. Влияние гармоник на коэффициент мощности.....	542
12.4. Нормирование гармоник в электрических сетях. Показатели качества электрической энергии.....	543
12.5. Ограничение уровней гармоник напряжений и токов.....	556
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	565
<b>Глава 13. Обеспечение электромагнитной совместимости при проектировании энергообъектов</b> .....	566
13.1. Общие положения.....	566
13.1.1. Требования к вторичному оборудованию по помехоустойчивости и помехоэмиссии.....	566
13.1.2. Требования по обеспечению заданной электромагнитной обстановки на энергообъекте.....	577
13.1.3. Исходные данные для проектирования.....	578
13.1.4. Порядок разработки проектных решений по обеспечению ЭМС.....	579
13.2. Компоновка оборудования, зданий и сооружений.....	580
13.3. Заземляющие устройства.....	587
13.3.1. Общие требования к заземляющим устройствам.....	587
13.3.2. Заземляющее устройство энергообъектов с открытыми распределительными устройствами.....	588
13.3.3. Заземление зданий и сооружений.....	593
13.3.4. Заземление КРУЭ.....	594
13.3.5. Заземление шкафов и панелей.....	594
13.3.6. Заземление экранов кабелей.....	595
13.4. Кабельная канализация.....	597
13.4.1. Общие положения.....	597

13.4.2. Методика расчета импульсных помех, наводимых во вторичных цепях при коротких замыканиях и коммутациях в первичных цепях .....	598
13.5. Молниезащита .....	601
13.6. Система оперативного постоянного тока .....	605
13.7. Система электропитания переменным током .....	607
13.8. Защита от электромагнитных полей радиочастотного диапазона .....	608
13.9. Защита от магнитных полей промышленной частоты .....	609
13.10. Защита от разрядов статического электричества .....	610
13.11. Авторский надзор за выполнением проекта и приемо-сдаточные испытания .....	612
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	613
<b>Глава 14. Методические указания по определению электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики</b> .....	614
14.1. Основные положения .....	614
14.2. Проведение измерений и расчетов по определению ЭМО .....	615
14.2.1. Определение напряжений и токов промышленной частоты при коротких замыканиях на шинах распределительного устройства .....	615
14.2.2. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях на шинах распределительного устройства .....	617
14.2.3. Импульсные помехи при ударах молнии .....	624
14.2.4. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона .....	625
14.2.5. Разряды статического электричества .....	626
14.2.6. Магнитные поля промышленной частоты .....	627
14.2.7. Импульсные магнитные поля .....	628
14.2.8. Помехи, связанные с возмущениями в цепях питания АСТУ постоянного и переменного тока .....	628
14.2.9. Помехи от вспомогательного электрооборудования .....	629
14.2.10. Оформление результатов измерений и расчетов .....	630
14.3. Меры безопасности при определении электромагнитной обстановки .....	631
14.4. Периодичность проведения работ по определению электромагнитной обстановки .....	631
<i>Вопросы для самопроверки</i> .....	631
<b>Приложение 1. Базовые публикации по ЭМС в области электроэнергетики</b> .....	632
<b>Приложение 2. Российские стандарты по ЭМС в электроэнергетике</b> .....	638
<b>Приложение 3. Гигиенические нормы напряженностей электрических и магнитных полей промышленной частоты</b> .....	646

<b>Приложение 4.</b> Рабочая программа проведения экспериментальных работ по определению ЭМО.....	649
<b>Приложение 5.</b> Протоколы измерений и расчетов.....	650
<b>Приложение 6.</b> Степени жесткости испытаний устройств на помехоустойчивость.....	662
<b>Приложение 7.</b> Требования к техническим средствам воздействий и измерений .....	672
<b>Приложение 8.</b> Имитация короткого замыкания на землю.....	675
<b>Приложение 9.</b> Требования к расчетным программам.....	677
<b>Приложение 10.</b> Рекомендуемые мероприятия по улучшению ЭМО.....	681
<b>Список литературы</b> .....	683

## Предисловие

Проблемы подготовки специалистов-электроэнергетиков и повышения квалификации кадров в областях электромагнитной совместимости и молниезащиты актуальны как никогда ранее. Обусловлено это рядом причин, в том числе постоянно расширяющимися масштабами применения высокочувствительной микропроцессорной техники для целей управления, защиты, регистрации параметров, обмена информацией и автоматизации технологических процессов.

Электромагнитная совместимость и молниезащита в современной электроэнергетике тесно взаимосвязана с рядом базовых дисциплин электроэнергетики, в частности, с техникой высоких напряжений, релейной защитой и автоматизацией энергосистем, электроэнергетическими системами и сетями, электрическими станциями, качеством электроэнергии в узлах нагрузки передающих и распределительных систем электроэнергии, техникой безопасности персонала на объектах электроэнергетики и вблизи них и др.

Поэтому авторы сочли целесообразным вопросы электромагнитной совместимости и защиты от первичных и вторичных проявлений молнии изложить в одной книге.

Подготовка специалистов в рассматриваемой области проводится в высших учебных заведениях недостаточно масштабно и углубленно. Одна из причин кроется в отсутствии учебников и учебных пособий, системно и на современном уровне излагающих вопросы электромагнитной совместимости и молниезащиты. Вторая причина состоит в дефиците подготовленных преподавательских кадров.

Сложность изучения электромагнитной совместимости и молниезащиты объясняется тем, что каждая из этих дисциплин представляет междисциплинарный предмет, опирающийся на углубленные знания в областях высшей математики, физики, теоретических основ электротехники и радиотехники, техники высоких напряжений, электромагнитных переходных процессов, микропроцессорной техники, импульсной информационно-измерительной техники и др.

Впервые в учебной литературе авторы попытались системно изложить актуальные проблемы электромагнитной совместимости и молниезащиты. При этом значительное внимание уделено источникам электромагнитных воздействий, каналам передачи электромагнитных помех и способам их ослабления, электромагнитной обстановке на объектах электроэнергетики, зонной концепции ограничения перенапряжений и помех, типовым схемам электроснабжения и размещению в них защитных устройств, обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики, помехам в кабелях при воздействии электромагнитного поля, экранам, молнии и молниезащите, практическим методам снижения помех на электрических станциях и подстанциях, экологическому и технологическому влиянию электрических и магнитных полей промышленной частоты, электромагнитной совместимости технических средств (качеству электроэнергии) в узлах нагрузки электрических сетей.

При подготовке учебника авторы опирались на результаты собственных исследований, а также на работы зарубежных и отечественных специалистов. Среди них Э. Хабигер, А. Шваб, Э. Вэнс, Г. Каден, Т. Уилльямс, J. Schimancki, K. Brinkmann, P. Hasse,

Э.М. Базелян, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин, Э.В. Вершков, Ю.С. Железко, И.В. Жежеленко, С.Л. Кужеков, К.П. Кадомская, В.С. Кармашев, Е.С. Колечицкий, А.Н. Кузнецов, В.П. Ларионов, Д.В. Развиг, О.В. Сарылов, Ф.И. Якобс и др.

Использованы международные и отечественные стандарты, руководящие документы, разработанные МЭК, СИСПР, СЕНЕЛЕК, ВОЗ, СИГРЭ, Госстандартом РФ, Минпромэнерго РФ, РАО «ЕЭС России», ПАО «Россети».

В третьем издании подверглись существенной переработке и дополнению главы 9, 11, 13 и приложения, в которых учтена российская обновленная и вновь разработанная нормативная база по ЭМС в электроэнергетике.

В расширенный список литературы включены не только наиболее важные отечественные, зарубежные научно-технические издания ведущих специалистов, но и последние публикации по ЭМС, в том числе нормативно-технических документов.

Предлагаемое читателю 3-е издание книги адресовано студентам электроэнергетикам на стадиях бакалавриата и магистратуры, аспирантам, преподавателям, инженерно-техническим работникам проектных, монтажно-наладочных и эксплуатационных организаций электроэнергетической отрасли, широкому кругу специалистов в области электроэнергетики и электроснабжения.

Авторы благодарят рецензентов за сделанные замечания при тщательном рецензировании учебника. Замечания и предложения просим направлять по адресу: Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

*Авторы*

## Основные термины и определения

**Автоматические и автоматизированные системы технологического управления (АСТУ)** – совокупность систем управления, реагирующих на параметры электрического режима оборудования (электрической сети) и предназначенных для реализации функций управления оборудованием электросетевого объекта, электрическим режимом сети (энергосистемы) в целях достижения надежного и экономичного функционирования оборудования в нормальном режиме, обеспечения нормативных показателей качества электроэнергии и сохранения устойчивости функционирования электросетевого объекта (энергосистемы) в аварийных режимах. К таким системам относятся АСДУ, АРН, АРЧМ, ПА, РЗА, АСУ ТП, ССПИ.

**Аппарат** – законченная комбинация приборов (элементов) с функциями, ориентированными на конечного пользователя.

**Внешние устройства молниезащиты** – комплекс, состоящий из молниеприемника, токоотводов и заземлителей.

**Внешний контур заземления (здания)** – замкнутый горизонтальный заземлитель, проложенный вокруг здания.

**Внутреннее устройство заземления (здания)** – совокупность заземляющих проводников, проложенных внутри здания.

**Внутренние устройства молниезащиты** – устройства, ограничивающие электромагнитные воздействия тока молнии внутри защищаемого объекта (пространства).

**Восприимчивость к электромагнитной помехе (электромагнитная восприимчивость)** – неспособность технического средства (ТС) работать без ухудшения качества функционирования при наличии электромагнитной помехи (МЭК 50-161–90). Восприимчивость к электромагнитной помехе представляет собой недостаточную помехоустойчивость.

**Выносной заземлитель** – заземлитель, выполненный за пределами территории энергообъекта.

**Высокочастотная электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, преобладающая часть спектра которой расположена на частотах, больших определенной частоты (ГОСТ Р 51317.2.2–2000).

**Грозовое облако** – облако с электрическим зарядом, достаточным для инициирования и развития молнии.

**Грозовой разряд** – электрический разряд в атмосфере между облаком и землей, между облаками, внутри облака, а также разряд из облака в направлении ионосферы.

**Динамическое изменение напряжения электропитания** – электромагнитная помеха, представляющая собой ступенчатое кратковременное изменение напряжения электропитания за регламентированный нижний или верхний предел, длительностью от полупериода частоты переменного тока до нескольких секунд с последующим возвращением к исходному значению.

**Длительность фронта (импульса)** – интервал времени между моментами, в которые мгновенный импульс достигает определенных минимального и максимального значений (Если не указано иное, то минимальное и максимальное значения составляют соответственно 10 и 90 % амплитуды импульса.)

**Естественный заземлитель** – находящиеся в соприкосновении с землей электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления.

**Заземлитель** – проводник или совокупность металлических соединенных между собой проводников, находящихся в соприкосновении с землей.

**Заземляющий проводник** – проводник, соединяющий заземляемые части с заземлителем.

**Заземляющее устройство** – совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

**Заряд молнии** – общее количество электричества, переносимое из грозового облака током молнии.

**Защитный угол** – угол между вертикалью, проведенной из точки расположения молниезащитного троса, и прямой, проведенной через эту точку, а также крайним фазным проводом воздушной линии электропередачи. Защитный угол вертикального стержневого молниеотвода – угол между молниеотводом и границей зоны защиты в виде конуса с вершиной, совпадающей с верхней точкой молниеприемника.

**Зона защиты (молниеприемника)** – пространство, внутри которого здание или сооружение защищено от прямых ударов молнии с надежностью не ниже определенного значения. Наименьшей и постоянной надежностью обладает поверхность зоны защиты; в глубине зоны защиты надежность выше, чем на ее поверхности.

**Излучаемая электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, распространяющаяся в пространстве (ГОСТ Р 50397–92).

**Импульс** – резкое кратковременное изменение физической величины с последующим быстрым возвращением к исходному значению (МЭК 50-161–90).

**Импульс напряжения в системе электроснабжения** – резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд (ГОСТ 13109–97).

**Импульсная помеха** – электромагнитная помеха, которая проявляется в тракте конкретного ТС как последовательность отдельных импульсов или переходных процессов (МЭК 50-161–90).

**Индустриальная радиопомеха** – радиопомеха, которая создается техническими средствами (ГОСТ 14777–76). К индустриальным радиопомехам не относятся радиопомехи высокочастотных трактов радиопередатчиков.

**Искусственный заземлитель** – заземлитель, специально выполняемый для целей заземления.

**Канал молнии** – ярко светящаяся нить с термической ионизацией и высокой электропроводностью.

**Качество электрической энергии** – совокупность свойств электрической энергии в электрической сети, определяющих электромагнитную совместимость ТС, подключенных к этой сети.

**Колебания напряжения** – серия единичных изменений напряжения во времени (ГОСТ 23875–88).

**Кондуктивная электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, распространяющаяся в проводящей среде (ГОСТ Р 50397–92).

**Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения** – величина, равная отношению действующего значения  $n$ -й гармонической составляющей напряжения к действующему значению основной составляющей переменного напряжения (ГОСТ 23875–88).

**Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения** – величина, равная отношению действующего значения суммы гармонических составляющих к действующему значению основной составляющей переменного напряжения (ГОСТ 23875–88).

**Крутизна тока молнии** – скорость изменения тока во времени.

**Лавина электронов** – увеличение числа свободных электронов вследствие ударной ионизации.

**Лидер** – светящийся канал разряда, в котором заметную роль играет термическая ионизация.

**Магистраль заземления** – заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями.

**Молниезащитное устройство** – система, предназначенная для защиты зданий или сооружений, оборудования и людей от воздействий молнии.

**Молниеотвод** – часть внешнего устройства молниезащиты, предназначенная для перехвата молний.

**Молниеприемник** – часть молниеотвода, непосредственно поражаемая молнией.

**Молниеприемная сетка** – многократные горизонтальные молниеприемники, пересекающиеся под прямым углом и укладываемые на защищаемый объект.

**Молния** – грозовой разряд, сопровождающийся протеканием тока, яркой световой вспышкой и громом.

**Молния восходящая** – молния, развивающаяся с земли в направлении грозового облака.

**Молния нисходящая** – молния, развивающаяся из грозового облака в направлении земли.

**Мощность электромагнитной помехи** – величина, измеренная в регламентированных условиях (МЭК 50-161–90).

**Наибольшее повышение потенциала земли** – разность между потенциалом металлической сетки подстанции и истинным, или удаленным, потенциалом земли.

**Напряжение прикосновения** – напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека.

**Напряжение шага** – напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека.

**Напряжение электромагнитной помехи** – напряжение, создаваемое электромагнитной помехой между двумя точками двух проводящих элементов, измеренное в регламентированных условиях (МЭК 50-161–90).

**Напряженность поля электромагнитной помехи** – напряженность поля, создаваемого электромагнитной помехой в данном месте в регламентированных условиях (МЭК 50-161–90).

**Низкочастотная электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, преобладающая часть спектра которой расположена на частотах, меньших определенной частоты (ГОСТ Р 51317.2.5–2000).

**Обратный разряд** – нейтрализация объемного заряда чехла и канала лидера молнии.

**Отдельностоящий молниеприемник** – молниеприемник, опора (опоры) которого установлена (установлены) на земле на некотором удалении от защищаемого объекта.

**Параллельный заземленный проводник** – проводник, предназначенный для снижения уровня наведенного на кабель напряжения и токовой нагрузки по экрану кабеля.

**Переходное напряжение корпуса КРУЭ** – переходное напряжение на металлическом корпусе КРУЭ, возникшее в результате протекания высокочастотных токов по корпусу.

**Переходный процесс** – процесс изменения величины между двумя стационарными состояниями (ГОСТ Р 50397–92).

**Пластина заземления (эталонное заземление)** – плоская проводящая поверхность, потенциал которой используется в качестве общего нулевого потенциала (ГОСТ Р 51320–99).

**Показатель качества электрической энергии** – величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам (ГОСТ 23875–88).

**Полное сопротивление заземления** – сопротивление относительно земли всех следующих элементов: подземных проводников, заземлителей, экранов кабелей, заземлителей прилегающих установок, металлических частей фундамента и других проводников.

**Постоянная составляющая тока молнии** – ток молнии между вспышками многократной молнии или после однократного обратного разряда.

**Порт** – граница между ТС и внешней электромагнитной средой (зажим, разъем, клемма, стык связи и т.п.) (ГОСТ Р 51317.6.1–99).

**Порт корпуса** – физическая граница ТС, через которую могут излучаться создаваемые ТС электромагнитные поля или проникать внешние электромагнитные поля (ГОСТ Р 51317.6.1–99).

**Провал напряжения в системе электроснабжения** – внезапное значительное снижение напряжения в системе электроснабжения с последующим его восстановлением (ГОСТ 23875–88).

**Противофазное (несимметричное, общего вида) напряжение** – напряжение между проводником и регламентированным эталоном, обычно землей или пластиной заземления.

**Пульсации напряжения постоянного тока** – процесс периодического или случайного изменения постоянного напряжения относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника, преобразователя электрической энергии или системы электроснабжения (ГОСТ 23875–88).

**Радиопомеха** – электромагнитная помеха, спектральные составляющие которой находятся в полосе радиочастот (МЭК 50-160–90).

**Размах колебаний напряжения** – величина, равная разности между наибольшим и наименьшим значениями напряжения за определенный интервал времени в установленном режиме работы источника, преобразователя электрической энергии или системы электроснабжения (ГОСТ 23875–88).

**Разряд статического электричества** – импульсный перенос электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами (ГОСТ Р 50397–90).

**Серия (импульсов или колебаний)** – последовательность ограниченного числа различных апериодических или колебательных импульсов ограниченной длительности.

**Симметричная составляющая напряжения нулевой последовательности** – симметричная составляющая несимметричной трехфазной системы напряжений, совпадающих между собой по фазе (ГОСТ 23875–88).

**Симметричная составляющая напряжения обратной последовательности** – симметричная составляющая несимметричной трехфазной системы напряжений с чередованием фаз, обратным принятому в качестве основного, при разложении по методу симметричных составляющих (ГОСТ 23875–88).

**Симметричная составляющая напряжения прямой последовательности** – симметричная составляющая несимметричной трехфазной системы напряжений с чередованием фаз, принятым в качестве основного, при разложении по методу симметричных составляющих (ГОСТ 23875–88).

**Синфазное (симметричное, дифференциального вида) напряжение** – напряжение между любыми двумя проводниками из заданной группы активных проводников (МЭК 50-161–90).

**Система** – несколько аппаратов, объединенных для выполнения конкретной задачи, эксплуатируемых и предлагаемых на рынке как единое целое.

**Стержневой молниеприемник** – вертикально расположенный молниеприемник.

**Стример** – стадия электрического разряда, следующая за лавинами, или волна ионизации.

**Техническое средство** – изделие, оборудование, аппаратура или их составные части, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и (или) электроники, содержащее электронные компоненты и (или) схемы, которые выполняют одну или несколько следующих функций: усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание (ГОСТ Р 50397–92).

**Ток молнии** – движение заряда при развитии стримеров, лидеров и при обратном разряде.

**Токоотвод** – часть внешнего устройства молниезащиты, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

**Ток электромагнитной помехи** – ток, создаваемый электромагнитной помехой.

**Точка присоединения** – точка присоединения к сети электропитания, применительно к которой рассматриваются характеристики электромагнитной совместимости (ГОСТ Р 51317.2.4–2000).

**Удельная энергия** – интеграл квадрата тока по времени.

**Узкополосная электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, действующая на ТС, ширина спектра которой меньше или равна ширине полосы пропускания ТС (ГОСТ Р 50397–92).

**Уровень (величины)** – среднее или другое взвешенное значение величины, изменяющейся во времени, например, мощности электромагнитной помехи, определяемой регламентированным способом за заданный интервал времени (МЭК 50-161–90).

**Уровень невосприимчивости** – максимальный уровень электромагнитного возмущения, при случайной подаче которого на определенный прибор, оборудование или систему он остается в достаточной степени работоспособным.

**Уровень устойчивости к электромагнитной помехе, уровень помехоустойчивости** – максимальный уровень электромагнитной помехи конкретного вида, воздействующей на определенное ТС, при котором ТС сохраняет заданное качество функционирования (МЭК 50-161–90).

**Уровень электромагнитной помехи** – значение величины электромагнитной помехи, измеренное в регламентированных условиях (ГОСТ Р 50397–92).

**Уровень электромагнитной совместимости** – определенный ожидаемый уровень электромагнитного возмущения, которое может воздействовать на прибор, оборудование или систему, работающие в определенных условиях.

**Установка** – комбинация устройств компонентов и систем, объединенных вместе и (или) смонтированных (отдельно) в заданном пространстве. По физическим причинам (например, большие расстояния между отдельными элементами) во многих случаях невозможно провести испытания установки как единого изделия; несколько аппаратов или систем объединенных в некотором месте в единое целое для выполнения определенной задачи, но не вводимых в эксплуатацию как единое целое и не предлагаемых на рынке в виде единого коммерческого продукта.

**Уровень защиты (молниезащитного устройства)** – категория устройства молниезащиты, характеризующая его эффективность.

**Установившееся отклонение напряжения** – отклонение напряжения в установленном режиме работы системы электроснабжения (ГОСТ 23875–88).

**Устойчивость к электромагнитной помехе, помехоустойчивость** – способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентированными значениями параметров при отсутствии дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения ТС (ГОСТ Р 50397–92).

**Фликер** – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебанием напряжения в электрической сети, питающей эти источники (ГОСТ 13109–97).

**Фликерметр** – средство измерений каких-либо количественных характеристик фликера (ГОСТ Р 51317.3.3–99).

**Широкополосная электромагнитная помеха** – электромагнитная помеха, воздействующая на ТС, ширина спектра которой больше ширины полосы пропускания ТС (ГОСТ Р 50397–92).

**Экран** – устройство, используемое для уменьшения электромагнитного поля, проникающего в защищаемую область.

**Экранированное помещение** – экранированное или имеющее металлические внутренние поверхности помещение, сконструированное специально для отделения внутренней электромагнитной обстановки от внешней в целях предотвращения ухудшения

качества функционирования ТС при воздействии внешних полей и ослабления электромагнитных излучений от ТС во внешнее пространство (ГОСТ Р 51317.4.5–99).

**Электрическая сеть общего назначения** – электрическая сеть энергоснабжающей организации, предназначенная для подачи электрической энергии различным потребителям электрической энергии или техническим средствам (ГОСТ 13109–97).

**Электромагнитная обстановка** – совокупность электромагнитных явлений и (или) процессов в данной области пространства и (или) данной проводящей среде в частотном и временном диапазонах; совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, в частотном и временном диапазонах (ГОСТ Р 30372–92); совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте (МЭК 50-161–90).

**Электромагнитная помеха<sup>1</sup>** – электромагнитное явление, процесс, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС (ГОСТ Р 50397–92); любое электромагнитное явление, которое может ухудшить работу ТС или неблагоприятно повлиять на живую или неживую материю (МЭК 50-161–90).

**Электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС ТС)** – способность ТС функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим ТС (ГОСТ Р 50397–92); способность ТС функционировать удовлетворительно в окружающей электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых помех чему-либо в этой обстановке (МЭК 50-161-90).

**Электромагнитное воздействие** – электромагнитные явления или процессы, которые влияют или могут повлиять на ТС и биологические объекты. К электромагнитным воздействиям относятся создаваемые ТС в окружающем пространстве электромагнитные, электрические и магнитные поля и (или) токи и напряжения в данной проводящей среде.

**Электромагнитное возмущение** – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить работу прибора, оборудования или системы или неблагоприятно влиять на срок службы.

**Электромагнитное излучение от источника помехи** – явление или процесс, при котором электромагнитная энергия излучается источником помехи в пространство в виде электромагнитных волн (ГОСТ Р 30372–92).

**Электромагнитный импульс** – изменение уровня электромагнитной помехи в течение времени, соизмеримого со временем установления переходного процесса в ТС, на которое это изменение воздействует (ГОСТ Р 50397–92).

**Электромагнитный экран (экран)** – экран из проводящего материала, предназначенный для уменьшения проникающего в защищаемый район электромагнитного поля.

**Электромагнитная эмиссия от источника помехи, помехоэмиссия** – генерирование источником помехи электромагнитной энергии (ГОСТ Р 30372–92).

**Энергообъект** – совокупность электроустановок, зданий и сооружений, функционально связанных и территориально приближенных.

---

<sup>1</sup> Различают электромагнитные помехи, характеризующие электромагнитную обстановку в местах размещения ТС (имеющие, как правило, случайный характер), и электромагнитные помехи, применяемые при испытаниях ТС на помехоустойчивость (как правило, регулярного характера) с регламентированными параметрами.

## Список сокращений

АБ	– аккумуляторная батарея
АРН	– система автоматического регулирования напряжения
АРЧМ	– система автоматического регулирования частоты и перетоков мощности
АСДУ	– автоматизированные системы диспетчерского управления
АСКУЭ	– автоматизированные системы контроля, учета (и управления) электропотреблением
АСТГ	– асинхронизированный синхронный турбогенератор
АСТУ	– автоматические и автоматизированные системы технологического управления
АСУ ТП	– автоматизированные системы управления технологическими процессами
АТ/Т	– автотрансформатор/трансформатор
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
АЭС	– атомная электростанция
ВЛ	– воздушная линия
ВН	– высокое напряжение
ВОЗ	– Всемирная организация здравоохранения
ВЧ	– высокочастотный
ГАЭС	– гидроаккумулирующая электрическая станция
ГИП	– газоизолированная подстанция
ГРЩ	– главный релейный щит
ГРЭС	– государственная районная электрическая станция
ГСТ	– генератор синусоидального тока
ГТЭМ	– поперечная электромагнитная волна гигагерцового диапазона
ГЩУ	– главный щит управления
ГЭС	– гидроэлектростанция
ДВ	– длинные волны
ДИН ФДЕ (DIN VDE)	– промышленные нормы Союза немецких электротехников
ДМВ	– дециметровые волны
ЕН (EN)	– «Европейские электротехнические нормы»
ЕНВ (ENV)	– «Европейские нормы предварительные»
ЕЭС	– Единая энергетическая система

ЗРУ	–	закрытое распределительное устройство
ЗУ	–	заземляющее устройство
ИБП	–	источник бесперебойного питания
ИП	–	источник питания
ИРПА (IRPA)	–	Международная организация по защите от ионизирующих излучений
КВ	–	короткие волны
КЗ	–	короткое замыкание
КЛ	–	кабельная линия
КП	–	контрольный провод
КРУЭ	–	комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией
КЭУ (CEU)	–	комиссии Европейского союза
ЛС	–	линия связи
ВЛ	–	линия электропередачи
МВ	–	метровые волны
МГД	–	магнитогидродинамический
МНР	–	металлооксидный нелинейный резистор
МПУ	–	микропроцессорные устройства
МОС (ISO)	–	Международная организация по стандартизации
МЭК	–	Международная электротехническая комиссия
НН	–	низкое напряжение
НЧ	–	низкочастотный
ОВЧ	–	очень высокая частота
ОДУ	–	оперативное диспетчерское управление
ОНЧ	–	очень низкая частота
ОП	–	ограничитель перенапряжений
ОПН	–	ограничитель перенапряжений нелинейный
ОПТ	–	оперативный постоянный ток
ОПУ	–	общеподстанционный пункт управления
ОРУ	–	открытое распределительное устройство
ОСШ	–	обходная система шин
ОТ	–	оперативный ток
ПА	–	система противоаварийной автоматики
ПАС (PAS)	–	провод (шина) опорного потенциала
ПВХ	–	поливинилхлоридная
ПЗП	–	параллельный заземленный проводник
ПКЭ	–	показатели качества электроэнергии
ПНП	–	поверхность нулевого потенциала

ППТ	– передача постоянного тока
ПС	– подстанция
ПТЭ	– правила технической эксплуатации
ПУЭ	– правила устройства электроустановок
ПФ	– полосовой фильтр
ПЭ	– полиэтиленовый
РВН	– разрядник вентильный низкого напряжения
РД	– руководящий документ
РДУ	– районное диспетчерское управление
РЗА	– релейная защита и автоматика
РСЭ	– разряды статического электричества
РТ	– редуцирующий трансформатор
РУ	– распределительное устройство
РФ	– режекторный фильтр
РЩ	– релейный щит
СВ	– средние волны
СВН	– сверхвысокое напряжение
СЕНЕЛЕК (CENELEC)	– Европейский комитет по нормированию в области электро-техники
СИГРЭ	– Международная конференция по энергетическим системам
СИСПР (CISPR)	– Специальный международный комитет по радиопомехам
СВЧ	– сверхвысокая частота
СК	– синхронный компенсатор
СН	– среднее напряжение
СО ЕЭС	– Системный оператор Единой энергетической системы
СОПТ	– система оперативного постоянного тока
ССПИ	– система сбора и передачи оперативной и технологической информации, включая телекоммуникационные линии и линии связи
СШ	– система шин
СЭ	– статическое электричество
ТН	– трансформатор напряжения
ТНМПЗ	– токи, наведенные магнитным полем Земли
ТС	– техническое средство
ТТ	– трансформатор тока
ТЭП	– теплоэлектропроект
ТЭС	– тепловая электрическая станция
ТЭЦ	– теплоэлектроцентраль
УВЧ	– ультравысокая частота

УЗО	– устройство защитного отключения
УРОВ	– устройство резервирования отключения выключателя
УХЛ	– умеренно холодное климатическое исполнение
ФВЧ	– фильтр высоких частот
ФНЧ	– фильтр низких частот
ХХ	– холостой ход
ШР	– шунтирующий разрядник
ЩПТ	– щит постоянного тока
ЩУ	– щит управления
ЭВМ	– электронная вычислительная машина
ЭГ	– электрогеометрическая
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭМ	– электромагнитное
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭМИ	– электромагнитный импульс
ЭМО	– электромагнитная обстановка
ЭМС	– электромагнитная совместимость
ЭМП	– электромагнитная помеха
ЭС	– электрическая станция
ЭСП	– энергосетьпроект
ЭТО	– электротехнический объект
ЭЭС	– электроэнергетическая система
ЯЭМИ	– ядерный электромагнитный импульс

# ГЛАВА 1

---

---

## ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

---

---

### 1.1. Общие положения

Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики (электрических станциях, подстанциях, линиях электропередачи) резко отличается от электромагнитной обстановки на других объектах (на промышленных предприятиях, в офисных, жилищных помещениях и т.д.).

Характерными особенностями этой обстановки является наличие постоянных во времени высоких напряженностей электрического поля промышленной частоты (до 25 кВ/м и выше) и напряженностей магнитного поля промышленной частоты (до  $10^3$  А/м и выше). Кроме того, на объектах электроэнергетики могут быть высокочастотные поля, обусловленные устройствами управления, сигнализации, передачи данных и т.д.

В целом электромагнитная обстановка достаточно сложна даже в стационарных условиях. Она представляет собой наложение полей естественного и искусственного происхождения, причем напряженности полей искусственного происхождения часто существенно превышают напряженности естественных полей. Ситуация осложняется тем обстоятельством, что электромагнитные поля искусственного происхождения подвержены быстрым изменениям, вследствие изменения режимов работы объектов электроэнергетики, возникновения аварийных ситуаций и т.д. В результате возникают возмущения стационарной электромагнитной обстановки.

**Источники электромагнитных воздействий.** Характерными источниками электромагнитных воздействий, которые могут оказывать влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами на электрических станциях и подстанциях, являются:

- переходные процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;
- коммутационные процессы в цепях высокого напряжения;
- переходные процессы в цепях высокого напряжения при коротких замыканиях, срабатывании разрядников или ограничителей перенапряжений;
- электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций;
- переходные процессы в заземляющих устройствах подстанции, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения;

- радиочастотные поля различного происхождения;
- разряды статического электричества;
- электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

Дополнительным источником электромагнитных возмущений на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе электронных и микропроцессорных устройств, является также вспомогательное электрооборудование, такое как сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструменты и др.

Кроме того, в устройствах автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами могут возникнуть и другие электрические явления, которые могут стать причиной их неправильного функционирования. К таким явлениям относятся: переходные сопротивления в контактных соединениях, шумы активных и пассивных элементов, дрейф параметров элементов, разброс времени коммутации в логических устройствах, исчезновения сигналов при передаче, явления отражения в линиях, вибрации и микрофонный эффект в контактах, пьезоэлектрические смещения зарядов при сжатии и изгибах изоляции, а также контактные напряжения, схемозлектрические и термоэлектрические эффекты в точках соединения проводников из различных материалов.

Наконец, два следующих вида воздействий должны рассматриваться в особых ситуациях:

- электромагнитные импульсы ядерных взрывов;
- магнитное поле Земли при аномальных явлениях на поверхности Солнца.

На рис. 1.1 изображены некоторые источники воздействий из отмеченных ранее на электростанциях и подстанциях высокого напряжения.

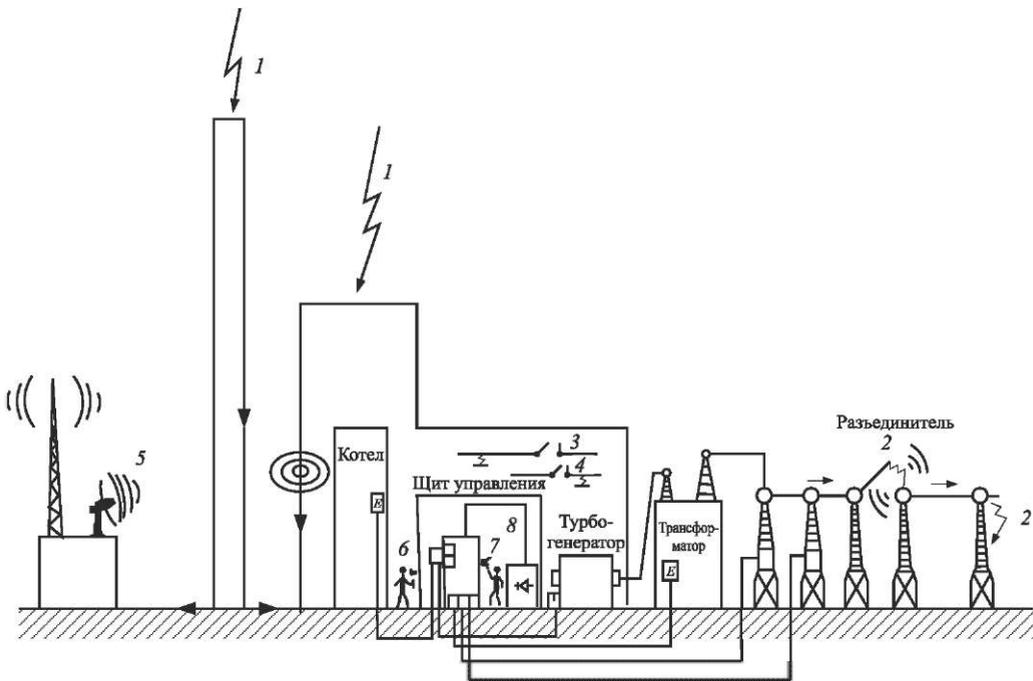
#### **Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех.**

Помехи, создаваемые источниками электромагнитных возмущений, могут возникать как в виде периодически появляющихся, так и случайно распределенных во времени величин. В обоих случаях речь может идти как об узкополосных, так и широкополосных процессах. При систематизации, в первом приближении, несмотря на бесконечное разнообразие вариантов, выделяют четыре типа помех. Характерные их примеры приведены на рис. 1.2, а именно, синусоидальные (например, постоянно действующие периодические узкополосные помехи в форме переменного напряжения 50 Гц или большей частоты), прямоугольные, периодические затухающие однократные импульсы и одиночные импульсы, образованные двумя экспонентами.

Помехи, возникающие в автоматических и автоматизированных системах технологического управления электротехническими объектами, могут рассматриваться как синфазные или противофазные напряжения (рис. 1.3).

**Противофазные напряжения электромагнитных помех** (поперечные, симметричные) возникают между проводами двухпроводной линии ( $u_d$  на рис. 1.3). Они непосредственно накладываются на полезные сигналы в сигнальных цепях или на напряжение питания в цепях электроснабжения, воздействуют на линейную изоляцию между проводами и могут быть восприняты как полезные сигналы в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления на электрических станциях и подстанциях и тем самым вызвать ошибочное их функционирование.

Противофазные напряжения помех возникают в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления через гальванические или полевые связи или преобразуются из синфазных напряжений помех в системах, несимметричных относительно земли.



**Рис. 1.1. Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:**

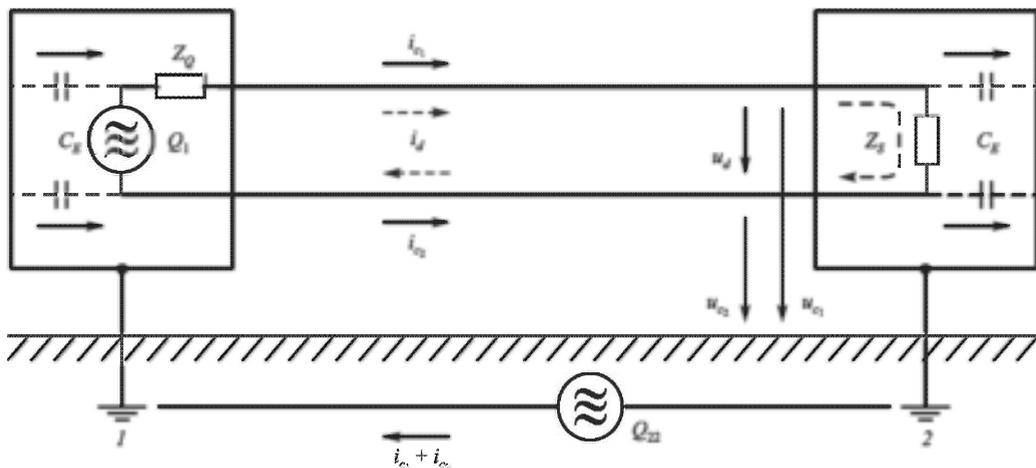
1 – удар молнии; 2 – переключения и короткие замыкания (КЗ) в сети высокого напряжения (ВН); 3 – переключения и КЗ в сети среднего напряжения (СН); 4 – переключения и КЗ в сети низкого напряжения (НН); 5 – внешние источники радиочастотных излучений; 6 – внутренние источники радиочастотных излучений; 7 – разряды статического электричества; 8 – источники кондуктивных помех по цепям питания

Периодические помехи		Непериодические, случайные помехи	
Узкополосные	Широкополосные	Узкополосные	Широкополосные
<i>Временная область, изменение помех во времени</i>			
$x = X_{\max} \sin \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$	$x = \frac{X_{\max} t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_0 = 2\pi/T$	$x = X_{\max} e^{-\delta t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$	$X = k(e^{-at} - e^{-bt})$ $k = f_1(X_{\max}, T_p, \tau)$ $a = f_2(T_p, \tau)$ $b = f_3(T_p, \tau)$
<i>Частотная область, амплитудные спектры</i>			
	$C =  c(n, \omega) $	$\frac{X_{\max}}{2\delta}$	$K \left( \frac{b-a}{ab} \right)$

C – амплитудный спектр

A – спектр амплитудной плотности

**Рис. 1.2. Виды электромагнитных помех**



**Рис. 1.3. Помехи, связанные с передачей сигналов по линии:**

$C_E$  – паразитные емкости относительно заземленного корпуса;  $Q_1$  – источник противофазных помех;  $Q_2$  – источник синфазных помех;  $Z_0, Z_S$  – полные сопротивления источника и приемника помех;  $i_1, i_2$  – синфазные токи;  $i_3$  – противофазный ток;  $u_1, u_2$  – синфазные напряжения помех;  $u_3$  – противофазное напряжение помех

**Синфазные напряжения электромагнитных помех** (несимметричные, продольные напряжения) возникают между каждым проводом и землей ( $u_{c1}, u_{c2}$ , рис. 1.3) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли.

Синфазные помехи обусловлены главным образом разностью потенциалов в цепях заземления устройства, например, между точками 1 и 2 (см. рис. 1.3), вызванной токами в земле (токи короткого замыкания или токи молнии). Они могут также возникать в результате воздействия магнитных полей.

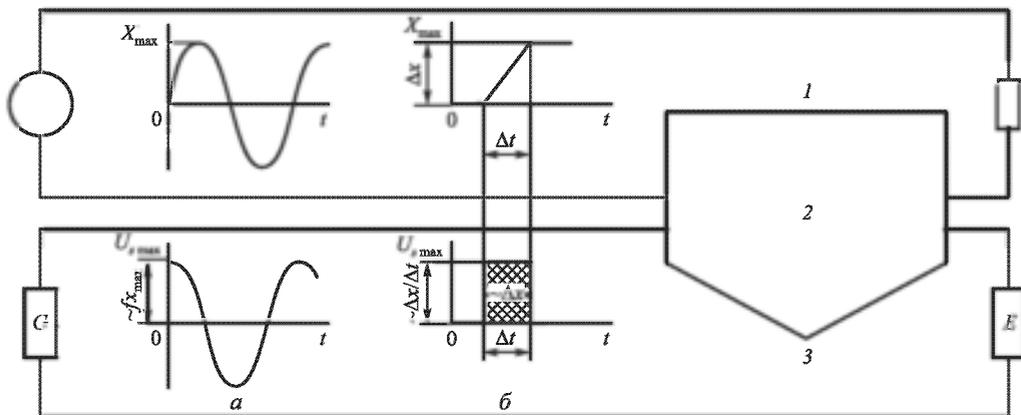
Параметры помех, в зависимости от электромагнитной обстановки на энергообъекте, могут изменяться в очень широком диапазоне (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Возможные диапазоны значений параметров помех**

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	$f$	0–10 <sup>10</sup>
Максимальное значение напряжения, В	$U_{\max}$	10 <sup>-6</sup> –10 <sup>6</sup>
Скорость изменения напряжения, В/с	$du/dt$	0–10 <sup>12</sup>
Напряженность электрического поля, В/м	$E$	0–10 <sup>5</sup>
Максимальное значение тока, А	$I_{\max}$	10 <sup>-9</sup> –10 <sup>5</sup>
Скорость изменения тока, А/с	$di/dt$	0–10 <sup>11</sup>
Напряженность магнитного поля, А/м	$H$	10 <sup>-6</sup> –10 <sup>8</sup>
Время нарастания импульса, с	$T_r$	10 <sup>-9</sup> –10 <sup>-2</sup>
Длительность импульса, с	$\tau$	10 <sup>-8</sup> –10
Энергия импульса, Дж	$W$	10 <sup>-9</sup> –10 <sup>7</sup>

**Способы описания и основные параметры помех.** Помехи можно представить и описать как во временной, так и в частотной областях. Рассмотрим систему из двух контуров, имеющих гальваническую, емкостную или индуктивную связи (рис. 1.4). В первичном (влияющем) контуре возникает помеха, которая передается во вторичный (подверженный влиянию) контур.



**Рис. 1.4. Параметры помех:**

*a* – периодические; *б* – непериодические; *E* – приемник сигналов; *G* – источник сигналов; *x* – помеха (напряжение или ток);  $U_{s\max}$  – напряжение помехи, обусловленное связью; *1* – влияющий контур; *2* – гальваническая, емкостная или индуктивная связь; *3* – контур, подверженный влиянию

Важнейшими параметрами периодических помех (рис. 1.4) являются частота  $f$  и амплитуда  $X_{\max}$  помехи в первичном контуре; эти параметры определяют амплитуду напряжения помехи  $U_{s\max}$  во вторичных контурах.

Важнейшими параметрами непериодических помех (см. рис. 1.4) являются:

- скорость изменения  $\Delta x/\Delta t$  (скорость нарастания или спада) помехи  $x$ ; она определяет максимальное напряжение помехи  $U_{s\max}$  во вторичной цепи;
- изменение времени  $\Delta t$ , или интервал времени, в течение которого, например, помеха  $x$  имеет максимальную скорость изменения амплитуды; этот интервал идентичен длительности действия напряжения помехи  $u_s$  во вторичной цепи;
- максимальное значение изменения амплитуды  $\Delta x$ , пропорциональное интегралу напряжения помехи вторичной цепи по времени (площади импульса помехи).

Для взаимосвязанного представления этих величин используют при периодических помехах амплитудный спектр, а при импульсных – спектр амплитудной плотности (см. рис. 1.2). Применительно к рассматриваемой (измеряемой) помехе оба представления позволяют:

- оценить воздействие помехи на узкополосную систему;
- рассчитать воздействие, обусловленное заданной связью;
- выбрать параметры средств подавления помех, например фильтров;
- определить граничные области, например, максимально возможного или допустимого излучения помех или характеризовать границы помехоустойчивости;
- наконец, получить представление о параметрах воздействий при испытаниях согласно нормам ЭМС.

Для количественной оценки величин, характеризующих ЭМС, пользуются логарифмическими масштабами электрических величин в относительных единицах, что позволяет наглядно представить соотношение величин, отличающихся на много порядков, а также умножать эти значения простым сложением их логарифмов. Различают два вида логарифмических относительных величин: уровень и меру сигнала.

*Уровень* – логарифм относительной величины с постоянной базой – знаменателем. При помощи понятия «уровень» можно описывать значения помех (напряжения, тока, напряженности полей помех и т.д.). В качестве базового значения напряжения, часто принимают  $U_0 = 1$  мкВ. Логарифм относительного напряжения называют уровнем напряжения. При применении десятичного логарифма справедливы следующие выражения для уровней:

– *напряжения*

$$u = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \text{ при } U_0 = 1 \text{ мкВ};$$

– *тока*

$$i = 20 \lg \frac{I_x}{I_0} \text{ при } I_0 = 1 \text{ мкА};$$

– *напряженности электрического поля*

$$E = 20 \lg \frac{E_x}{E_0} \text{ при } E_0 = 1 \text{ мкВ/м};$$

– *напряженности магнитного поля*

$$H = 20 \lg \frac{H_x}{H_0} \text{ при } H_0 = 1 \text{ мкА/м};$$

– *мощности*

$$P = 20 \lg \frac{P_x}{P_0} \text{ при } P_0 = 1 \text{ пВт}.$$

Чаше уровень мощности выражают в неперах (Нп)

$$P = 0,5 \ln \frac{P_x}{P_0}.$$

Уровень сигнала является величиной безразмерной. Физическая природа описываемых величин подчеркивается принятыми для них обозначениями, такими, как  $u$ ,  $i$ ,  $E$ ,  $H$ ,  $P$ , а размерность базовой величины указывается в индексе или в скобках, например дБ (мкВ), дБ (мкА) и т.д.

*Мера сигнала* – логарифм отношения величин для обозначения измеряемых свойств объекта (степени передачи, коэффициентов усиления, ослабления). При этом берут отношение величин на входе и выходе системы или отношение величин в определенной точке при наличии и отсутствии демпфирующего элемента (фильтра, экрана). Например, коэффициент затухания,  $a_e$ , вносимого фильтром, выражают с помощью десятичного логарифма отношения  $U_{20}/U_2$ :

$$a_e = 20 \lg \frac{U_{20}}{U_2};$$

при наличии экрана

$$a_s = 20 \lg \frac{E_0}{E_1}.$$

$U_2$  и  $U_{20}$  – напряжения помех на входе с фильтром и без него;  $E_1$  и  $E_0$  – воздействующие на прибор напряженности электрического поля без экрана и с ним соответственно.

С помощью натурального логарифма можно выразить отношение величин в неперах, например:

– для напряжения

$$U_{\text{Нп}} = \ln (U_x/U_0)$$

(1 непер соответствует отношению  $U_x/U_0 = e$ , а для энергетических величин – отношению  $P_x/P_0 = e^2$ ),

– для мощности

$$P_{\text{Нп}} = 0,5 \ln (P_x/P_0).$$

Между непером и децибелом существуют соотношения

$$\ln (U_x/U_0) = 20 \lg (U_x/U_0),$$

или

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ} \text{ и } 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}.$$

Понятие «помехоподавление» служит для характеристики защитного воздействия средств защиты от помех. Чаще всего оно указывается в зависимости от частоты. Помехоподавлением характеризуют, например, логарифм отношения напряжений на входе  $U_1$  и выходе  $U_2$  фильтра (коэффициент затухания  $a_\phi$ ) или напряженности поля перед экраном  $H_0$  и за ним  $H_3$  (коэффициент экранирования  $a_3$ ):  $a_\phi = 20 \lg (U_1/U_2)$ ;  $a_3 = 20 \lg (H_0/H_3)$ .

## 1.2. Переходные процессы при ударах молнии

Молния является наиболее мощным естественным источником электромагнитных возмущений.

В настоящее время получены достаточно достоверные сведения по основным параметрам молнии (амплитуда тока, крутизна фронта, параметры грозовой активности и т.д.) для положительных и отрицательных ее импульсов при любом возможном механизме их образования.

При рассмотрении вопросов ЭМС следует иметь в виду, что молния и связанные с ней электромагнитные поля обуславливают сильное влияние в месте удара и вблизи него. При разработке устройств внутренней молниезащиты учитывают максимальное значение и крутизну нарастания тока. В каждом конкретном случае могут быть рассчитаны электрические и магнитные поля, связанные с полным током молнии или токами в заземляющем устройстве, а также индуктированные ими токи и напряжения в цепях автоматизированной системы технологического управления электротехническим объектом. При этом необходимо учитывать такие факторы, как удаление от места удара молнии, конфигурацию приемной системы, характеристики зданий, заземляющих устройств и др.

### 1.2.1. Электромагнитное поле тока молнии при ударе в землю

Формулы для расчета электрических и магнитных полей, создаваемых током молнии на уровне земли на различных расстояниях от места удара, служит рис. 1.5.

Формулы для расчета напряженности электрического поля  $E_z(d, t)$  и индукции  $B_z(d, t)$  следующие:

$$E_z(d, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \int_0^z \frac{2z^2 - d^2}{R^5} \left( \int_0^t i \left[ z \left( t - \frac{R}{c} \right) \right] d\tau \right) dz + \right. \\ \left. + \int_0^z \frac{2z^2 - d^2}{cR^4} i \left[ z \left( t - \frac{R}{c} \right) \right] dz - \int_0^z \frac{d^2}{c^2 R^3} \left( \frac{di \left[ z \left( t - \frac{R}{c} \right) \right]}{dt} \right) dz \right\};$$

$$B_z(d, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int_0^z \frac{d}{cR^3} i \left[ z \left( t - \frac{R}{c} \right) \right] dz + \int_0^z \frac{d^2}{cR^2} \left( \frac{di \left[ z \left( t - \frac{R}{c} \right) \right]}{dt} \right) dz \right\},$$

где  $i(z, t)$  – ток молнии;  $\epsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;  $c$  – скорость света в вакууме.

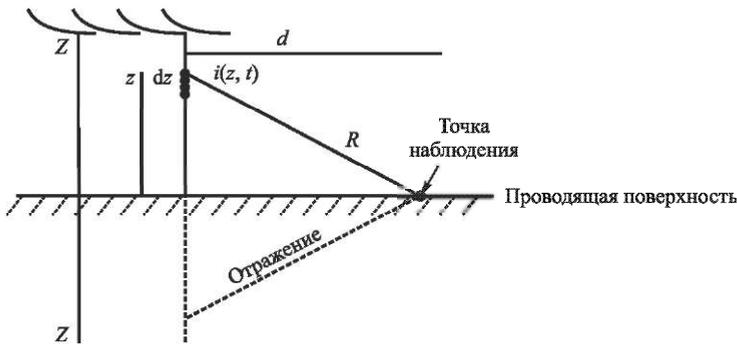
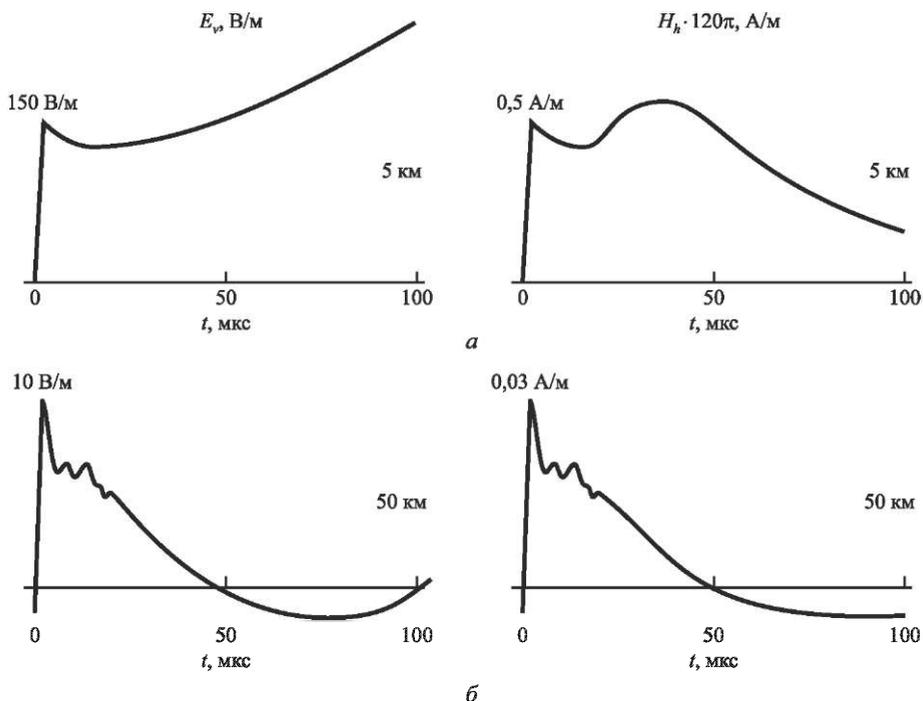


Рис. 1.5. Расположение канала молнии при оценке электрического и магнитного полей, создаваемых током молнии

Существуют различные модели расчета зависимости  $i(z, t)$ , базирующиеся на экспериментальных данных.

По уравнениям Максвелла можно рассчитать электрические и магнитные поля на уровне земли на расстоянии  $d$  от вертикального канала молнии. При этом делается допущение, что канал молнии представляет собой вертикальную антенну высотой  $Z$ , поверхность земли имеет нулевое сопротивление, а радиус поперечного сечения канала молнии много меньше, чем минимально возможная длина волны тока молнии.

Типичные результаты измерений вертикальной составляющей электрического поля ( $E_v$ ) и горизонтальной составляющей магнитного поля ( $H_h$ ), полученные одновременно на расстоянии 5 и 50 км от первого удара и последующего обратного удара молнии показаны на рис. 1.6.



**Рис. 1.6.** Результаты измерений вертикальной составляющей напряженности электрического ( $E_v$ ) и горизонтальной составляющей напряженности магнитного ( $H_h$ ) полей:

*a* – на расстоянии 5 км от места удара; *б* – на расстоянии 50 км от места удара

На основе выполненных исследований были определены следующие характеристики электрических и магнитных полей, создаваемых током молнии:

- вертикальная составляющая напряженности электрического поля ( $E_v$ ) и горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля ( $H_h$ ) на порядок и более превышают горизонтальную составляющую напряженности электрического поля ( $E_h$ ) и вертикальную составляющую напряженности магнитного поля ( $H_v$ );
- вертикальная составляющая электрического поля ( $E_v$ ) и горизонтальная составляющая магнитного поля ( $H_h$ ) представляют собой кривую с очень крутым первым фронтом, за которым следуют всплески с гораздо менее крутым фронтом (рис. 1.6). Первый фронт обоих компонентов имеет одинаковую крутизну и представляет собой так называемую излучаемую составляющую поля, затухающую обратно пропорционально расстоянию ( $1/d$ ). Последующие фронты (всплески) соответствуют емкостной и индуктивной составляющим, которые уменьшаются с расстоянием быстрее, чем пропорционально  $1/d^2$  и  $1/d^3$  соответственно. С дальнейшим увеличением расстояния до нескольких десятков километров излучаемая составляющая становится преобладающей, а вертикальная составляющая электрического поля ( $E_v$ ) и горизонтальная составляющая магнитного поля ( $H_h$ ) становятся взаимосвязанными через волновое сопротивление вакуума, равное  $120\pi$ , Ом.

Применительно к ЭМС максимальная крутизна  $S'_{Em}$  первого фронта кривой напряженности электрического поля является очень важной величиной.

Эта величина пропорциональна наибольшей крутизне фронта тока молнии  $S_{Im} = (dI/dt)_{\max}$

$$S_{Em} = \left[ \frac{v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \right] \frac{S_{Im}}{d},$$

где  $v$  – скорость фронта волны тока молнии,  $v = (0,2-0,6)$  с.

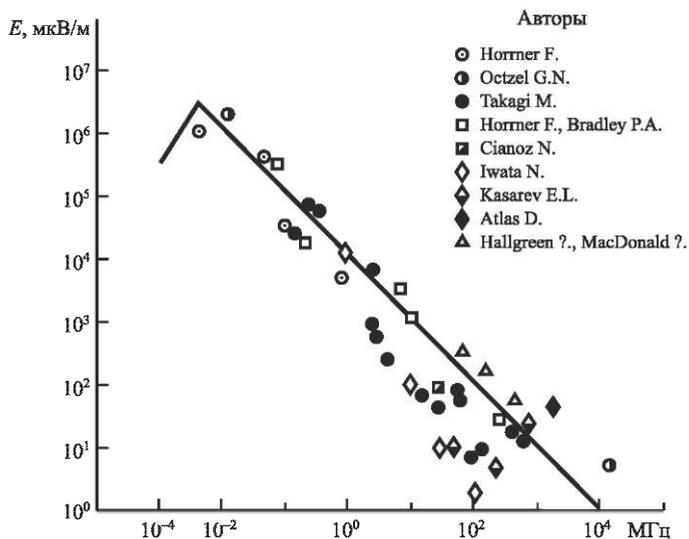
Крутизна тока молнии согласно последним измерениям может составлять до 300 кА/мкс. В наиболее известных документах СИГРЭ и МЭК, посвященных этому вопросу, приводятся значения крутизны фронта тока на уровне 200 кА/мкс, с вероятностью того, что эта крутизна будет превышена не менее 0,01.

Расчитанные максимальные крутизны первого фронта кривой электрического поля молнии во время разряда могут удерживаться в течение нескольких сотен наносекунд.

Токи разрядов между облаками вызывают появление значительно более слабых электромагнитных полей по сравнению с токами разрядов в землю. Так, электромагнитное поле вблизи разряда между облаками по величине сопоставимо с полем основного разряда, развивающемся на расстоянии 10 км от него. В связи с этим разряды между облаками представляют интерес только для аэронавигации.

Оказалось, что при протекании обратного тока молнии и токов разряда между облаками, при рекомбинации зарядов и развитии лидера генерируются электромагнитные поля в диапазоне ОВЧ и УВЧ.

На рис. 1.7 приведена кривая Пирса, представляющая собой кривую напряженности электрического поля тока молнии (измеренную, с учетом всех ранее упомянутых составляющих) в диапазонах частот от 1 кГц до 1 МГц при обратном разряде и от десятков мегагерц до гигагерц, возможно, в процессах рекомбинации зарядов либо развитии стреловидного лидера.



**Рис. 1.7. Усредненный спектр амплитудных значений напряженности электрического поля, образующегося при разряде молнии на расстоянии 10 км (кривая Пирса) по данным исследований различных авторов**

## 1.2.2. Прямые удары молнии в линии электропередачи и другие элементы электроустановок

**Прямое попадание молнии в линию электропередачи.** Результатом такого воздействия является бегущая волна, распространяющаяся вдоль линии электропередач.

При прямом попадании молнии в фазный провод вид фронта и спада импульса напряжения зависит от формы тока молнии.

Длительность фронта импульса может составлять доли микросекунд, а его крутизна – до 50 МВ/мкс. Крутизну импульса напряжений можно рассчитать как

$$V_{\max} = S_{lm} \frac{Z_c}{2},$$

где  $Z_c$  – волновое сопротивление линии.

Импульс имеет длительность (время до момента уменьшения импульса до половины его амплитуды) порядка нескольких десятков мкс.

В случае обратного перекрытия с опоры или заземленного троса на фазный провод длительность фронта импульса напряжения составляет порядка нескольких десятков наносекунд (до нескольких сотен наносекунд при большой длине промежутка), в то время как длительность импульса меньше, чем в случае прямого попадания молнии в фазный провод, и составляет от 5 до 15 мкс.

В обоих случаях наклон  $S$  сглаживается в той части фронта импульса, где напряжение превышает начальное напряжение импульсной короны  $U_0$ , что приводит к уменьшению крутизны фронта импульса при ее прохождении некоторого расстояния  $d$ . Для инженерного расчета крутизны фронта  $S_d$  бегущего импульса на расстоянии  $d$  от места удара молнии ( $S_d$ ) используют следующую формулу:

$$S_d = \frac{S}{1 + AdS},$$

где  $S$  – крутизна фронта импульса в месте удара молнии, кВ/мкс;  $d$  – расстояние, м;  $A$  – параметр искажения.

Эффект сглаживания фронта импульса имеет огромное значение. Так, на расстоянии около 1 км (или немного меньше) от места удара, вне зависимости от формы импульса в месте удара, крутизна фронта импульса будет не меньше 1 МВ/мкс.

Для ЭМС наиболее важным является перекрытие изоляции ВЛ. Вследствие пробоя образуется резкий срез импульса напряжения (обычно на спаде) длительностью порядка десятков или нескольких сотен наносекунд.

При движении импульса вдоль ВЛ крутизна этого среза остается практически неизменной, так как импульсная корона не оказывает на него заметного влияния. Крутизна этого среза может уменьшаться только из-за потерь в линии.

Таким образом, срезанный импульс, возникающий при перекрытии линейной изоляции, оказывает более сильное воздействие на оборудование (например, на вторичные обмотки трансформатора тока), присоединенное непосредственно к линии, чем фронт.

**Удары молнии на территории подстанции.** При расчете эффектов, обусловленных молнией при прямом ударе в элементы подстанций (здания, грозозащитные тросы или заземленные токоведущие части открытой подстанции), ВЧ излучение, создаваемое каналом молнии, обычно не учитывают.

В этой ситуации основную роль играет распределение импульсных токов молнии по элементам подстанции, включая оборудование, попадающее в зону растекания тока молнии.

Можно отметить два основных механизма передачи помех:

- низкочастотный механизм, связанный с повышением потенциала заземлителя и напрямую связанный с амплитудой тока молнии;
- высокочастотный механизм, главным образом, зависящий от пространственного расположения элементов ПС (и в меньшей степени связанный с их заземлением) и напрямую связанный с крутизной фронта тока молнии.

На практике непосредственные попадания молнии в элементы ПС могут рассматриваться как квазистационарные явления. Следовательно, для практического моделирования пригодна теория цепей, особенно в тех случаях, когда элементы могут быть представлены в виде взаимосвязанного набора проводящих ветвей. Таким образом, при помощи классической теории цепей можно оценить распределение импульсных токов по объекту.

Анализ процессов в модели выполняется в некотором диапазоне частот, а затем используется принцип суперпозиции результатов воздействия при различных частотах.

Основные особенности разработанной модели сводятся к следующему:

- при оценке помех цепи или элементы сооружения представляют как часть сети, а напряжения и токи в них определяют как наведенные в элементах сети. При таком подходе становится возможным анализ распространения импульса, если рассматриваемое сооружение достаточно дискретизировано и учтены паразитные емкости;
- математическая модель позволяет одновременно учесть взаимодействия между всеми токами, протекающими в различных ветвях элементов модели сети. При расчете активного сопротивления ветвей учитывается поверхностный эффект. Между двумя соседними узлами может быть помещена цепь из активного сопротивления, емкости и индуктивности (*RLC*-цепочка). Если расстояние между ветвями много больше их размеров, то взаимные индуктивности между ними можно не учитывать;
- наличие земли учитывают посредством отображений проводников на определенной глубине в земле, в зависимости от частоты и удельного сопротивления земли.

Результаты лабораторных испытаний, достаточно хорошо согласующиеся с результатами расчетов, приведены на рис. 1.8.

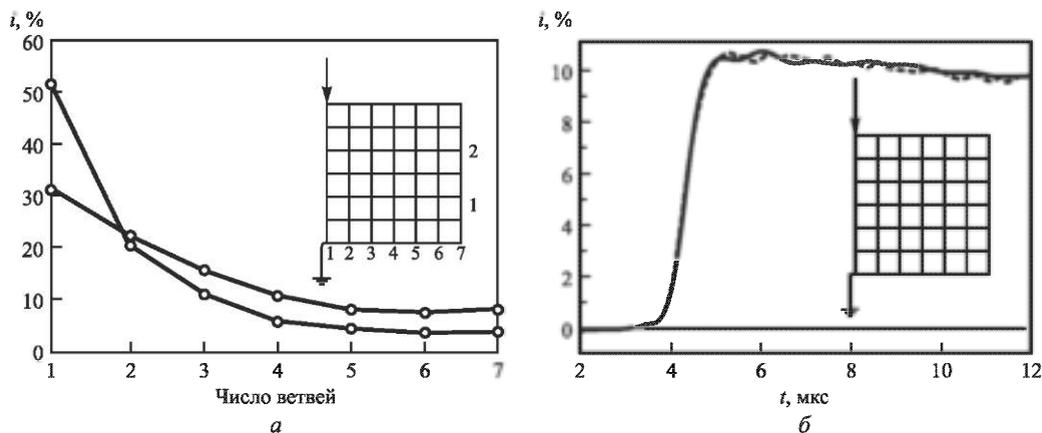


Рис. 1.8. Результаты расчетов и лабораторных испытаний:

*a* – распределение импульсных токов по ветвям объекта (смоделированного сеткой из медной проволоки диаметром 1 мм и ячейками размером 500 мм), полученное при воздействии импульсного тока стандартной формы (1,2/50 мкс); *б* – измеренное (пунктир) и расчетное (сплошная линия) значение тока в одной из ветвей проволочной сетки, обозначенной цифрой 1

### 1.2.3. Воздействие электромагнитного поля молнии на линии электропередачи или сооружения

Данный механизм воздействия имеет особенное значение для распределительных линий низкого и среднего напряжения и гораздо менее важен для линий высокого напряжения, поскольку он сопровождается пробоями изоляции на линиях среднего напряжения, вызванных индуктированными грозовыми перенапряжениями.

Результатом индуктированных перенапряжений является бегущий импульс тока и напряжения, распространяющийся по линии подобно импульсам, вызванным прямыми ударами молнии в ВЛ.

Амплитуда импульса напрямую зависит от расстояния от места удара молнии в землю до линии. Она возрастает при увеличении высоты линии и заметно уменьшается вследствие экранирования заземленными грозозащитными тросами, если они имеются.

На линиях среднего и низкого напряжения амплитуда бегущего импульса часто превышает напряжение пробоя изоляции, что вызывает ее пробой и срез импульса.

В месте ВЛ, ближайшем к месту удара молнии, вид фронта импульса подобен результату воздействия прямого удара молнии, в то время как длительность импульса волны заметно меньше и составляет 5–10 мкс. Выводы, сделанные при рассмотрении искажения формы импульса импульсной короной и пробоями изоляции, применимы не только к прямому попаданию молнии в провода ВЛ и обратным перекрытиям, но и в полной мере к данному случаю.

Если сооружение имеет меньшие размеры (длину), чем ВЛ, то и запасаемая им электромагнитная энергия будет меньше. Возмущение же, переданное от сооружения к оборудованию, присоединенному или расположенному в непосредственной близости от сооружения, будет меньше, чем при прямом воздействии излучения тока молнии. В этом случае сооружение выступает в роли экрана для излучаемого поля.

### 1.2.4. Стандартизированные параметры тока молнии

В стандарте МЭК 61312-1 приведены нормированные параметры импульса тока молнии (рис. 1.9 и табл. 1.2–1.4).

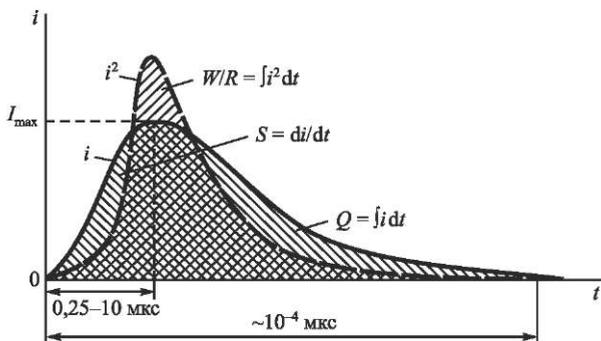


Рис. 1.9. Форма импульса тока молнии  $i$  и поражающие факторы тока молнии:

$W/R$  – удельная энергия;  $S$  – крутизна тока;  $Q$  – заряд;  $I_{\max}$  – максимальный ток

Средний ток приблизительно равен  $Q/T$ .

Удары молнии в молниеприемники на территории энергообъекта, как правило, вызывают нарушения в работе автоматизированных систем технического управления

электротехническими объектами: повреждения кабелей и элементов устройств, неправильное функционирование отдельных устройств.

Таблица 1.2

**Параметры первого импульса тока молнии,  
развивающейся с положительно заряженного облака**

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимум тока, кА	200	150	100
Длительность фронта, $T_1$ , мкс	10	10	10
Длительность импульса, $T_2$ , мкс	350	350	350
Заряд в коротком импульсе, $Q_s$ , Кл	100	75	50
Удельная энергия, $W/R$ , МДж/Ом	10	5,6	2,5

Таблица 1.3

**Параметры второго импульса тока молнии,  
развивающейся с отрицательного заряженного облака**

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимум тока, кА	50	37,5	25
Длительность фронта, $T_1$ , мкс	0,25	0,25	0,25
Длительность импульса, $T_2$ , мкс	100	100	100
Средняя крутизна, $S$ , кА/мкс	200	150	100

Таблица 1.4

**Параметры постоянной составляющей тока молнии**

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Заряд, $Q$ , Кл	200	150	100
Длительность, $T$ , с	0,2-0,8	0,2-0,8	0,2-0,8

Анализ таких случаев на действующих подстанциях и станциях, показал, что при ударах молнии в молниеприемники, расположенные вблизи кабельных каналов или лотков, происходит пробой изоляции кабелей с земли. В результате перекрытия изоляции импульс перенапряжения распространяется по вторичным цепям системы (например, оперативного тока), вызывая повреждение отдельных элементов устройств.

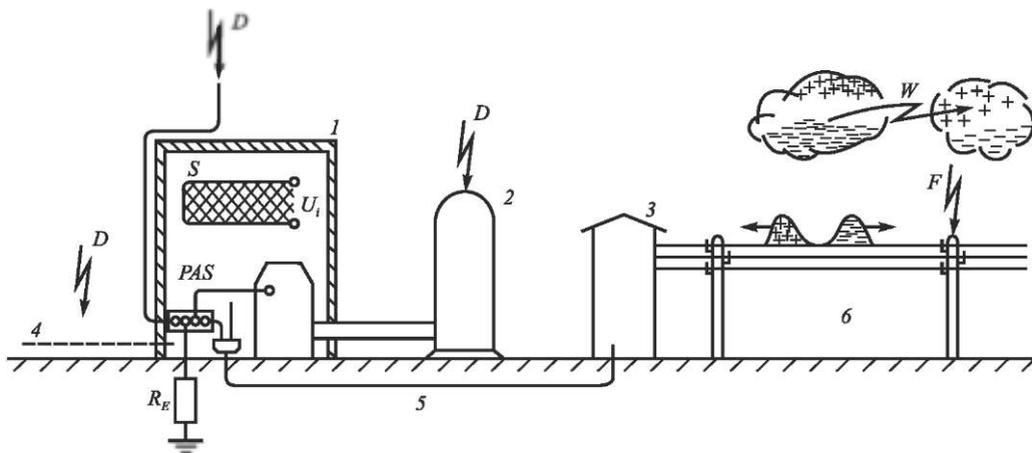
Амплитудно-частотные характеристики импульсных помех, возникающих в кабелях, изменяются в широком диапазоне и зависят от параметров тока молнии, трассы и длины кабелей, нагрузки на концах кабелей. Частотный спектр изменяется от десятков

килогерц до нескольких мегагерц. Амплитуда импульсных помех может составлять от десятков вольт до десятков киловольт.

Следующие воздействия представляют опасность при ударах молнии в территорию энергообъекта:

- непосредственное попадание в высоковольтное оборудование и здания;
- воздействие на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами импульсных магнитных полей от тока молнии;
- перекрытие с заземляющего устройства через грунт на кабели автоматической и автоматизированной системы технологического управления электротехническими объектами;
- перекрытие с поверхности земли на жилы кабелей;
- обратное перекрытие с молниеприемника на первичное оборудование;
- индуктирование импульсных перенапряжений в цепях вторичной коммутации.

На рис. 1.10 дана иллюстрация воздействия молнии на энергообъект, а в табл. 1.5 приведены некоторые их характеристики.



**Рис. 1.10. Возможные воздействия молнии:**

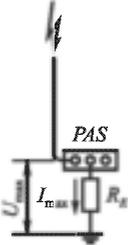
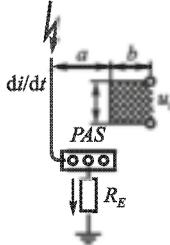
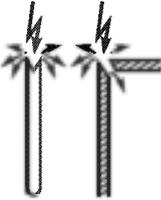
$D$  – непосредственный удар;  $F$  – удаленный разряд;  $PAS$  – шина выравнивания потенциалов;  $R_E$  – сопротивление заземления (0,5–10 Ом);  $S$  – петля, образованная проводами;  $W$  – разряд между облаками; 1 – защищаемый объект; 2 – часть защищаемого устройства; 3 – трансформаторная подстанция; 4 – кабель линий управления, связи; 5 – кабель низкого напряжения; 6 – воздушная линия электропередачи

Непосредственное попадание молнии в оборудование высокого напряжения и здания исключается за счет правильного выбора зон защиты молниеприемников.

При определении типа и мест размещения молниеприемников, (стержневой, тросовый или сетка на здании), а также токоотводов и заземления молниеприемника необходимо рассчитывать не только зоны защиты от прямого удара молнии, но и уровни воздействий на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами.

Рассмотрим удар молнии в стержневой молниеприемник, расположенный вблизи кабельного канала.

## Характеристики воздействия молнии на объекты

Наименование	Параметр			
	Максимальный ток $I_{\max}$	Крутизна тока $S = di/dt$	Заряд $Q = \int i dt$	Удельная энергия $W/R = \int i^2 dt$
Величина	2–200 кА	2–200 кА/мкс	150–300 А·с	2,5–10 МДж/Ом
Воздействие в точке удара	Повышение потенциала относительно удаленной земли	Индуктирование напряжения в петлях	Плавление металла в точках удара	Нагрев проводников, по которым протекает ток молнии
Схема воздействия				
Примеры	$I_{\max} = 200 \text{ кА}$ $R_E = 5 \text{ Ом}$ ; $U_{\max} = 1 \text{ МВ}$	$S = 200 \text{ кА/мкс}$ ; $a = 10 \text{ м}$ ; $b = 0,1(10) \text{ м}$ ; $u_i = 40 \text{ В}$ (216 кВ)	При $Q = 300 \text{ Кл}$ плавятся алюминиевые стенки толщиной до 5 мм	При $W/R = 10 \text{ МДж/Ом}$ плавятся медные провода сечением 10 мм <sup>2</sup> и стальные сечением 25 мм <sup>2</sup>

Сопротивление растеканию импульса тока молнии (первый импульс 100 кА, 10/350 мкс) может составлять от единиц до десятков ом в зависимости от удельного сопротивления грунта. При этом потенциал молниеприемника  $U_{\text{молн}}$  при ударе молнии составит от сотен киловольт до нескольких мегавольт. Средняя напряженность пробоя в грунте обычно принимается  $E_{\text{ср.пр}} = 300 \text{ кВ/м}$ .

Исходя из этих условий минимально допустимое расстояние от молниеприемника или от его заземляющего устройства до кабельного канала по условию пробоя в грунте составит

$$L_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{молн}}}{E_{\text{ср.пр}}} = \frac{10^5 - 10^6}{3 \cdot 10^5} \approx 0,3 - 3 \text{ м.}$$

При ударе молнии в молниеприемники, расположенные ближе указанных расстояний до кабельных каналов, с большой вероятностью произойдет перекрытие с заземляющего устройства молниеотвода на кабели.

Минимальное расстояние от токоотводов молниеприемника до места размещения автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами определяется также из условия

$$l \geq \frac{I}{2\pi H_{\text{доп}}}$$

где  $I$  – ток;  $H_{\text{доп}}$  – допустимая напряженность импульсного магнитного поля для рассматриваемых систем.

Учитывая, что автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами установлены в железобетонных зданиях и в металлических шкафах, вводят коэффициент ослабления магнитного поля, обусловленного особенностями конструкции. Для импульсных полей тока молнии указанный коэффициент для зданий и шкафов, в которых размещаются автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами, как правило, более 10.

Расчет наведенных в кабелях импульсных напряжений обычно проводят с использованием специальных программ. Наведенные напряжения зависят от длины, типа и трассы прокладки кабелей, а также от расстояния между молниеприемником и кабельным каналом. Так, например, на неэкранированной кабеле длиной 100 м, лежащем на поверхности земли на расстоянии 10 м от молниеприемника, индуцируется напряжение около 60 кВ при ударе молнии (при втором импульсе тока 25 кА, длительности фронта 0,25 мкс).

Пробивное напряжение для воздуха в условиях неравномерного импульсного поля составляет  $E_{\text{возд.проб}} = 500$  кВ/м. Максимальный потенциал на молниеприемнике составит

$$U_{\text{м}} = R_{\text{и}} I_{\text{т}} + \Delta U_{\text{мп}},$$

где  $R_{\text{и}}$  – импульсное сопротивление заземлителя;  $\Delta U_{\text{мп}}$  – падение напряжения на молниеотводе. Тогда допустимое расстояние от первичных цепей до молниеприемника можно оценить по формуле

$$L_{\text{перв}} = U_{\text{м}} / E_{\text{возд.проб}}.$$

### 1.3. Коммутационные процессы в цепях высокого напряжения

Коммутации высоковольтными выключателями и разъединителями (рис. 1.11 и 1.12) на электростанциях и подстанциях вызывают электромагнитные помехи, вследствие резкого изменения напряжения  $\Delta U$  на шинах высокого напряжения распределительного устройства подстанции или электростанции.

Изменение напряжения  $\Delta U$  в первичной цепи вызывает в ней переходный процесс и появление колебательных затухающих импульсов тока и напряжения (серию импульсов в случае повторных зажигания дуги).

Первоначальное значение тока (амплитудное значение) пропорционально отношению  $\Delta U$  к волновому сопротивлению первичной цепи. Следовательно, можно ожидать, что амплитуда тока примерно пропорциональна напряжению системы (табл. 1.6).

Время изменения напряжения сильно зависит от расстояния между контактами выключателя ВН и может варьироваться от нескольких наносекунд для подстанций с элегазовой изоляцией до нескольких десятков или даже сотен наносекунд для подстанций и станций с открытым распределительным устройством.

Коммутации с разъединителями характеризуются многократными (до 5000 раз и более) повторными зажиганиями дуги. Время коммутации зависит от типа разъединителя и составляет от десятков миллисекунд до нескольких секунд.

**Амплитуда импульсной составляющей тока  
в аппаратах высокого напряжения на ПС при коммутациях и КЗ**

$U_n$ , кВ	110		220		330		500		750	
	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
$I_{\text{ОПН, КЗ}}$ , кА	0,48	1,9	0,95	3,8	1,15	6,2	2,75	11,0	4,75	19,0
$I_{\text{РВ min, КЗ}}$ , кА	0,55	2,2	1,1	4,25	1,8	7,0	3,2	12,8	4,4	17,6
$I_{\text{РВ max, КЗ}}$ , кА	0,88	3,5	1,8	7,1	2,2	8,7	3,3	15,3	5,4	21,5
$I_{\text{ком max}}$ , кА	0,225		0,45		0,77		1,450		2,450	
$I_{\text{ком вер}}$ , кА	0,035		0,09		0,23		0,50		0,85	

Обозначения:  $U_n$  – напряжение сети;  $n_{\text{линий}}$  – число отходящих линий;  $I_{\text{ОПН, КЗ}}$  – амплитуда импульса тока, проходящего в заземлитель при коротком замыкании на подстанции с ОПН;  $I_{\text{РВ min, КЗ}}$ ;  $I_{\text{РВ max, КЗ}}$  – амплитуда импульса тока при коротком замыкании на подстанции с вентильными разрядниками (при минимальном и максимальном значении пробивного напряжения);  $I_{\text{ком max}}$  – максимальное значение тока при коммутациях с разъединителями ВН;  $I_{\text{ком, вер}}$  – наиболее вероятное значение тока при коммутациях с разъединителями ВН.



**Рис. 1.11. Коммутация разъединителем на ОРУ 500 кВ**



**Рис. 1.12. Коммутация разъединителем на ОРУ 330 кВ**

Крутизна фронта импульсов тока и напряжения зависит от скорости изменения напряжения, а частота колебаний зависит от характеристик первичной цепи и может составлять от десятков кГц до единиц МГц для подстанций и станций с открытым распределительным устройством и до десятков МГц для подстанций с элегазовой изоляцией.

Колебательные затухающие импульсы тока и напряжения могут распространяться по шинам распределительного устройства и создавать электрические и магнитные поля.

Результаты измерений напряженностей магнитных и электрических полей, вызванных отключением разъединителя на ОРУ 110 кВ показаны на рис. 1.13. Измерения проводили на расстоянии 3 м от шин. На рис. 1.14 и 1.15 показаны результаты измерений электрических и магнитных полей, вызванных отключением разъединителей 500 кВ. Измерения проводили на уровне земли непосредственно под шинами напряжением 500 кВ на подстанциях с воздушной и элегазовой изоляцией.

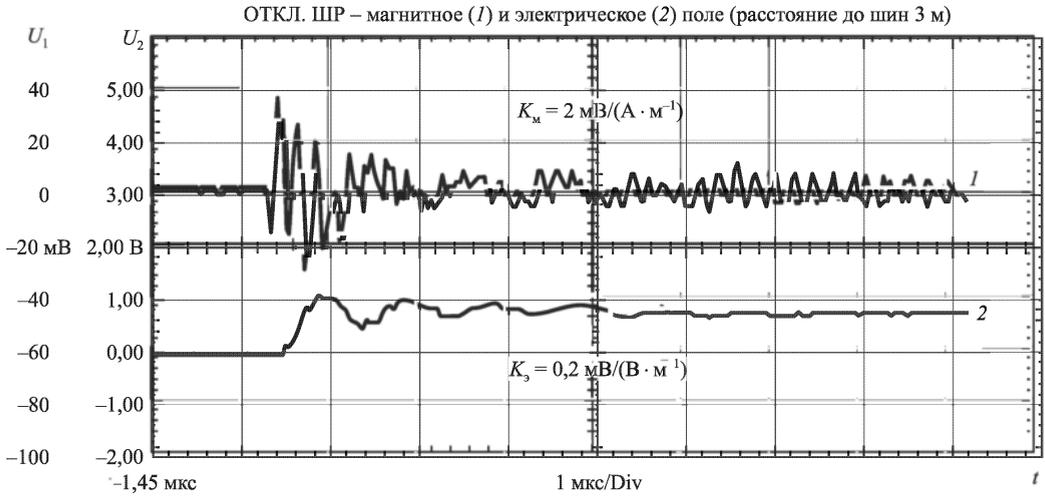
Результаты измерений (см. рис. 1.14) подтверждают, что напряженность магнитного поля прямо пропорциональна току в шинопроводе. Значение напряженности магнитного поля, аналогично значению тока, в течение нескольких микросекунд уменьшается до нуля, в то время как электрическое поле, зависящее от заряда шинопровода, достигает некоторого установившегося значения.

В табл. 1.7 приведены характерные значения напряженности электрического и магнитного полей и частоты их колебаний при отключениях разъединителей и выключателей открытых распределительных устройств и элегазовой ячейки. Измерения проводили непосредственно под шинами присоединений на уровне земли.

Сравнение осциллограмм (рис. 1.14 и 1.15) позволяет отметить следующие основные отличия переходных процессов на подстанции с элегазовой изоляцией от процессов на подстанции с воздушной изоляцией:

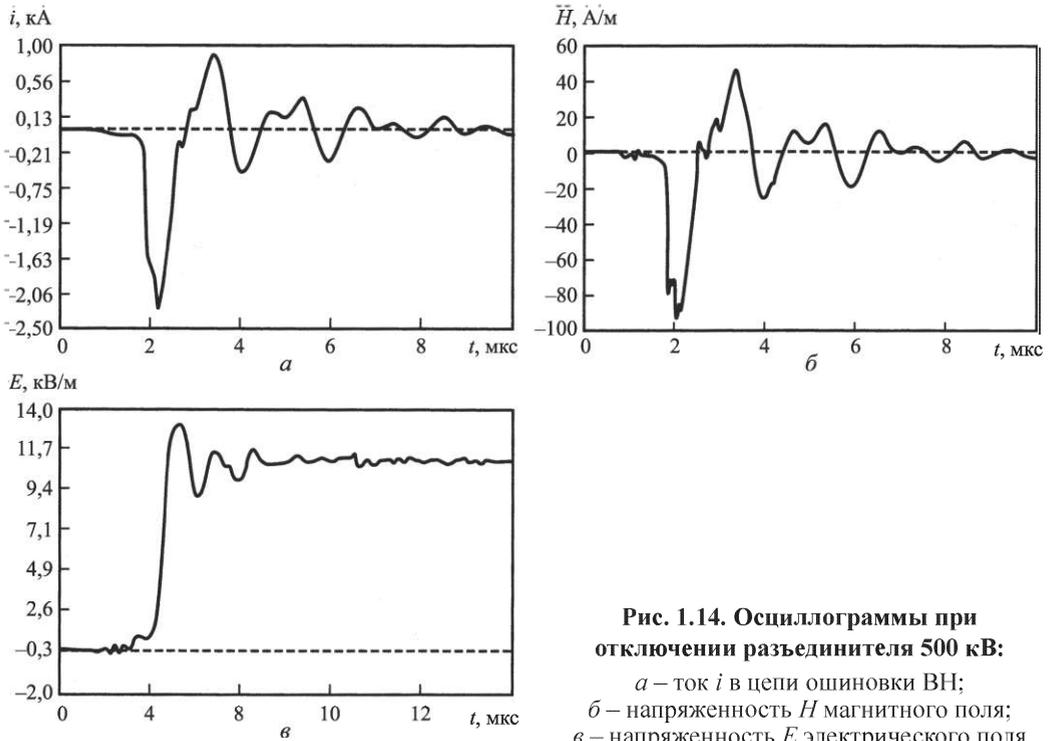
- основная частота колебаний переходного процесса на подстанции с элегазовой изоляцией, по крайней мере, в 10 раз выше;
- максимальные напряженности электрических и магнитных полей на подстанции с элегазовой изоляцией несколько ниже;

- постоянная времени затухания колебаний напряжения на подстанции с элегазовой изоляцией меньше;
- напряженность электрического поля на подстанции с элегазовой изоляцией за небольшой промежуток времени снижается до нуля.



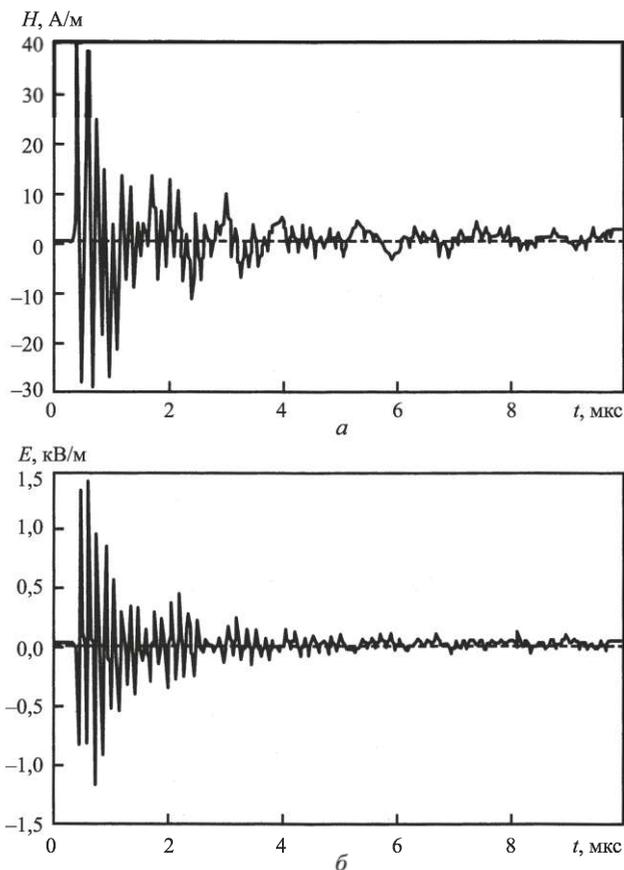
**Рис. 1.13. Осциллограммы напряженностей магнитного и электрического полей при отключении шинного разъединителя на ОРУ 110 кВ:**

1 – напряженность магнитного поля; 2 – напряженность электрического поля



**Рис. 1.14. Осциллограммы при отключении разъединителя 500 кВ:**

а – ток  $i$  в цепи ошиновки ВН;  
 б – напряженность  $H$  магнитного поля;  
 в – напряженность  $E$  электрического поля



**Рис. 1.15. Осциллограммы изменения напряженностей при отключении разьединителя 500 кВ на подстанции с элегазовой изоляцией:**

*а* – магнитного поля, *б* – электрического поля, *Е*

Магнитные и электрические поля, возникающие при операциях с силовыми выключателями, сравнимы по значению с данными табл. 1.7.

Вероятной основной причиной уменьшения напряженности магнитного и, особенно, электрического полей служит наличие металлического заземленного экрана (корпус КРУЭ).

Опыт показывает, что наиболее сильные магнитные поля создаются вблизи мест соединений или мест заземления корпуса КРУЭ. Вследствие этого таким местам следует уделять повышенное внимание.

Пробой электрической изоляции (КЗ на землю) или срабатывание разрядников приводит к снижению потенциала токоведущих частей установки ВН, что, в свою очередь, вызывает переходный процесс подобно тому, как это происходит при коммутационных операциях. Ток короткого замыкания, протекающий по заземляющему устройству установки, вызывает повышение его потенциала, содержащего высокую и промышленную частоты колебаний.

Амплитуда такого тока, в первом приближении, прямо пропорциональна напряжению пробоя, которое может быть значительно больше напряжения повторного зажигания дуги при коммутациях (см. табл. 1.6). Такие ситуации могут вызывать появление

сильных электромагнитных возмущений, особенно если происходят в непосредственной близости от приемника помех.

Таблица 1.7

**Напряженность электрического и магнитного полей на ОРУ  
и вблизи элегазовой ячейки**

Номинальное напряжение, кВ	Коммутируемый аппарат	Напряженность электрического поля и частота колебаний		Напряженность магнитного поля и частота колебаний	
		$f$ , МГц	$E$ , кВ/м	$f$ , МГц	$H$ , А/м
500	Разъединитель на ОРУ	0,5	15,0	0,5	150,0
230		1,0–2,0	6,0	1,0–2,0	90,0
115		2,0–3,0	10,0	2,0–3,0	50,0
500	Выключатель на ОРУ	2,1–80,0	7,0	1,0–40,0	20,0
230		12,0–30,0	1,2	30,0	9,0
115		0,1	4,0	0,1–30,0	0,7
500	Разъединитель в элегазовой ячейке	20,0	8,0	10,0	100,0
230		115,0	5,0	40,0	90,0
115		–	–	–	–

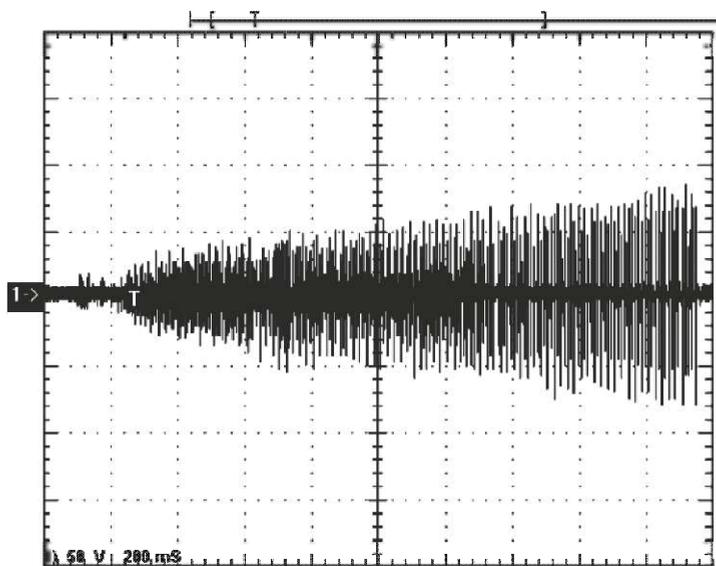
Срабатывание искровых разрядников менее опасно, чем пробой изоляции, из-за меньшего напряжения перекрытия и удаленного положения этих устройств. Однако амплитудные значения параметров таких переходных процессов намного выше, чем при повторных зажиганиях дуги в коммутационных аппаратах.

Зажигание дуги в вентильном разряднике вызывает, подобно искровому разряднику, появление переходных процессов высокой частоты. Максимальные значения параметров переходного процесса ниже, вследствие действия остаточного напряжения на нелинейном сопротивлении разрядника. Наличие нелинейного сопротивления предотвращает появление больших токов замыкания на землю промышленной частоты.

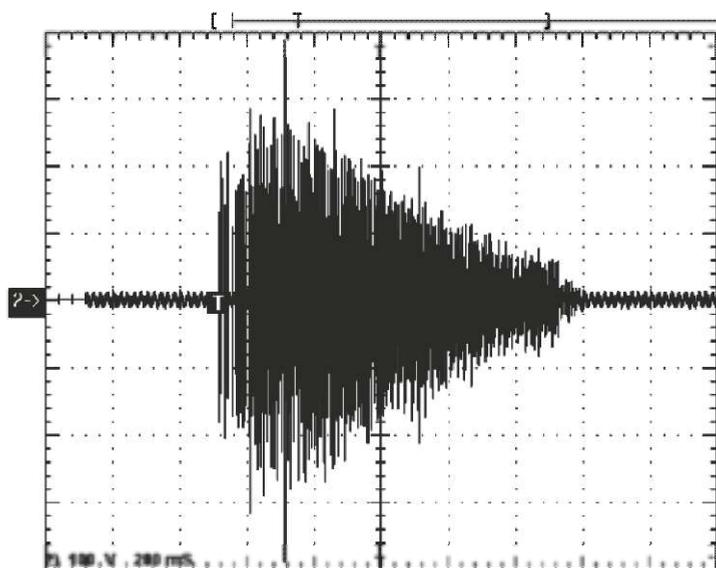
Срабатывание ограничителей перенапряжений не приводит к появлению высокочастотных переходных процессов в сети, так как переход ОПН из практически непроводящего состояния в проводящее происходит плавно.

В ходе обследования действующих энергообъектов выявлено, что при коммутациях цепей высокого напряжения разъединителями и выключателями во вторичных цепях возникают импульсные помехи в виде колебательных затухающих импульсов различной частоты, продолжительности и декремента колебаний (рис. 1.13–1.17). При коммутациях разъединителем имеет место наиболее продолжительный процесс из серии импульсов – до нескольких тысяч за одну коммутацию. При коммутациях выключателями возникают помехи в виде нескольких импульсов.

Максимальное значение импульсных помех на обследованных объектах составило от десятков вольт до нескольких киловольт, а длительность импульсов – от единиц до десятков микросекунд. Для энергообъектов с открытым распределительным устройством амплитуда помехи приблизительно пропорциональна номинальному напряжению. Более высокий уровень импульсных помех при коммутациях разъединителями и выключателями наблюдается на объектах с высоким удельным сопротивлением грунта.



*a*



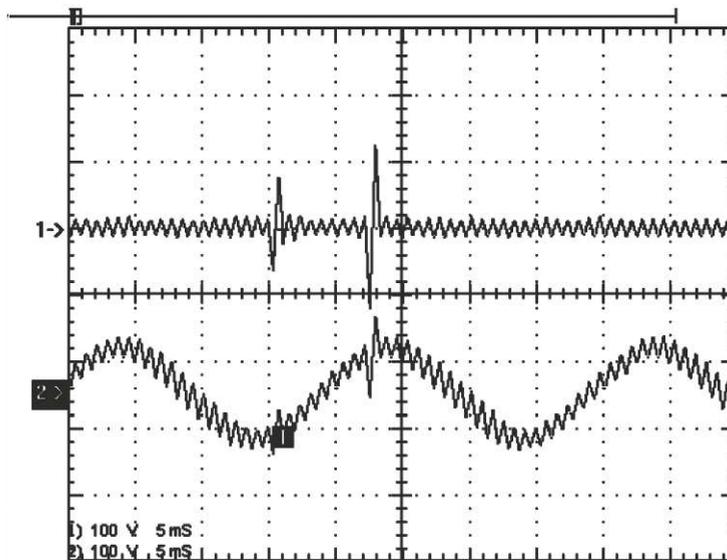
*б*

**Рис. 1.16. Серия импульсных помех при коммутации разъединителей:**

*a* – отключения разъединителя 330 кВ (масштаб 50 В/дел., 200 мс/дел.);

*б* – включения разъединителя 400 кВ (масштаб 100 В/дел., 200 мс/дел.)

Чем ближе проходит трасса кабелей автоматизированной системы технологического управления к шинам высокого напряжения, тем выше уровень помех. При прокладке кабелей в лотках уровень помех ниже, чем для контрольного кабеля, проложенного по той же трассе на поверхности земли в несколько раз из-за взаимного экранирования кабелей в лотке. Для кабелей, проложенных в кабельном канале в земле ниже контура заземления, уровень помех снижается в сотни раз по отношению к уровню помех в контрольном кабеле на поверхности земли.



**Рис. 1.17. Импульсные помехи в цепях напряжения при коммутации выключателем 330 кВ:**

1 – фаза B (заземлена), 2 – фаза A (масштаб 100 В/дел., 5 мс/дел.)

Наибольшие уровни помех регистрируются в измерительных цепях напряжения, заземленных в распределительном устройстве. В некоторых случаях наблюдаются резонансные явления, когда амплитуда помех возрастает в несколько раз. В частотном спектре импульса присутствует несколько составляющих. Диапазон изменения этих частот для энергообъектов лежит в интервале от десятков килогерц до десятков мегагерц. Основная частота помехи увеличивается с уменьшением размеров распределительного устройства. Для подстанций с элегазовой изоляцией основная частота на порядок больше, чем для открытой подстанции.

#### **1.4. Электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций**

Силовое оборудование подстанций и станций (шины, силовые кабели, реакторы, трансформаторы и т.д.), находящееся под напряжением создает вокруг себя электрические и магнитные поля промышленной частоты и гармонических составляющих.

Напряженности этих полей зависят от класса напряжения и тока в силовом оборудовании, а кроме того, и от пространственного положения проводников с током (в частности, от высоты проводников над поверхностью земли, междуфазного расстояния, последовательности фаз и числа цепей).

В качестве примера на рис. 1.18 приведены результаты расчета электрических и магнитных полей, создаваемых высоковольтной ВЛ в нормальных эксплуатационных условиях. Даны эпюры напряженности электрического поля и магнитной индукции при поперечном разрезе ВЛ в середине пролета. Вследствие того, что провес проводов в середине пролета наибольший, в других аналогичных разрезах создаваемые поля будут заметно меньшими.

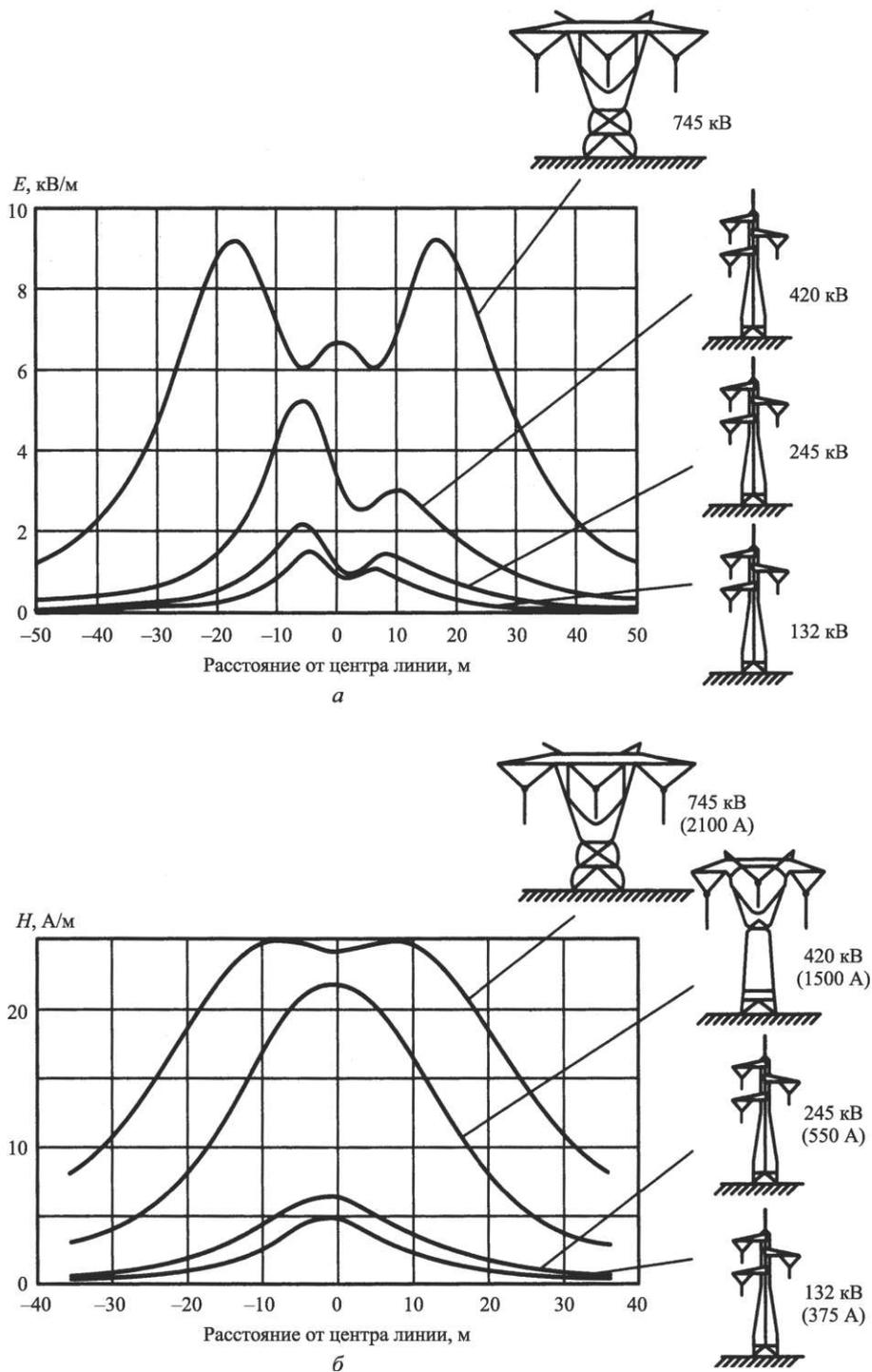
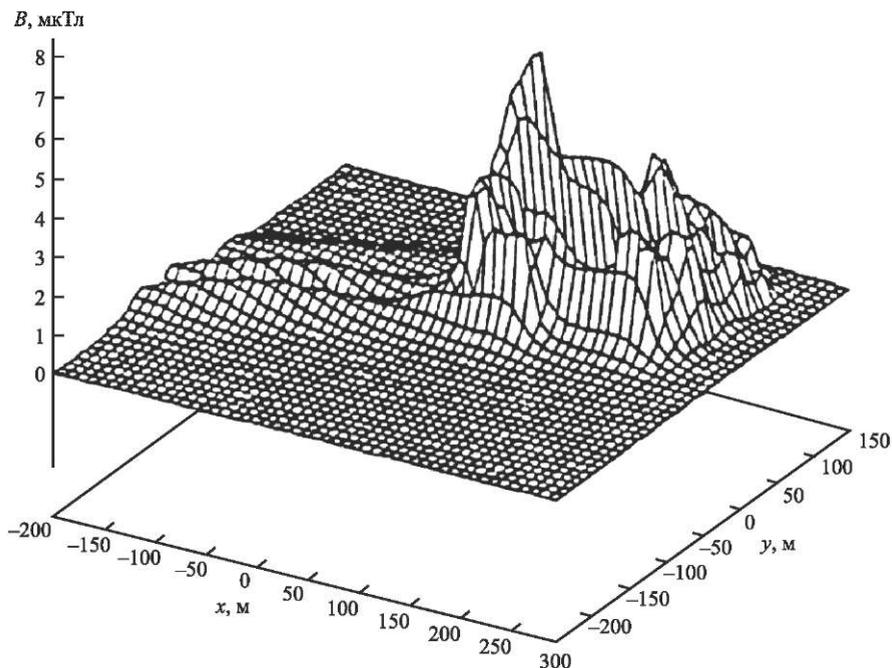


Рис. 1.18. Эпюры напряженности электрического и индукции магнитного полей промышленной частоты, создаваемых на уровне поверхности земли под ВЛ:

$a$  – вертикальная составляющая напряженности электрического поля;  
 $b$  – магнитное поле

Результаты рисунков напряженностей электрических и магнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, обычно хорошо согласуются с результатами измерений, так как ВЛ имеют относительно простую конфигурацию.

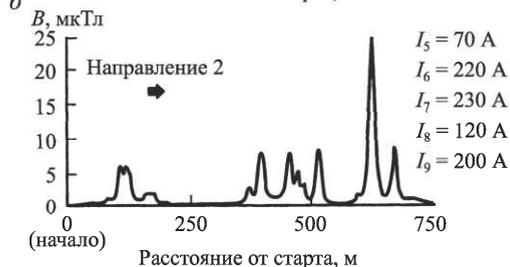
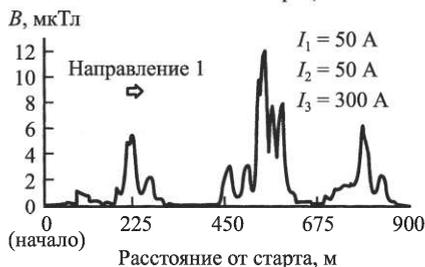
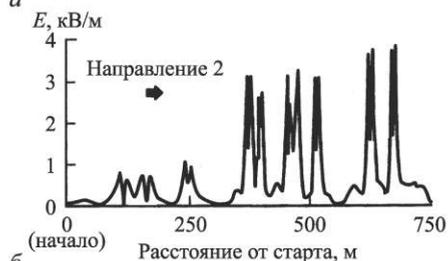
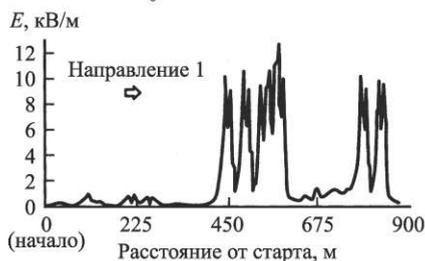
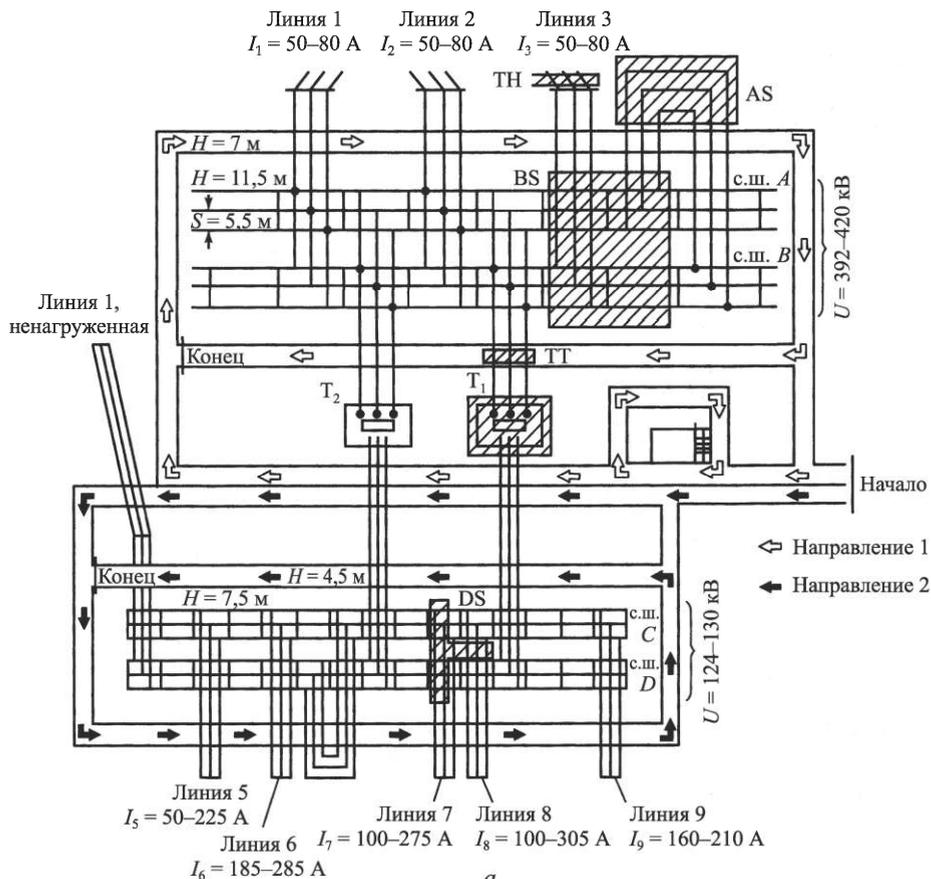
Расчеты напряженностей электрических и магнитных полей на территории ОРУ, электростанций и подстанций затруднены вследствие экранирующего действия многочисленного силового оборудования, расположенного в различных местах ОРУ. На рис. 1.19 приведена карта магнитного поля частотой 50 Гц, полученная в результате такого приближенного расчета. Более достоверные сведения могут быть получены на основе измерений. На рис. 1.20 в качестве примера показаны результаты измерений, выполненных на подстанции напряжением 380/130 кВ.



**Рис. 1.19. Результаты расчета индукции магнитного поля частотой 50 Гц на территории подстанции**

Магнитные и электрические поля промышленной частоты (а также гармонические составляющие низкой частоты) могут оказывать неблагоприятное влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами из-за низкочастотных наводок в цепях сигнализации и управления, в измерительных цепях, воздействуя непосредственно на терминалы микропроцессорных устройств и на мониторы компьютеров. Магнитное поле токоограничивающих реакторов на релейном щите управления подстанции показано на рис. 1.21. Расположение реакторного помещения в непосредственной близости от щита управления является примером неучета обеспечения ЭМС автоматической и автоматизированной системы технологического управления электротехническими объектами на стадии их проектирования.

В табл. 1.8 приведены некоторые данные по напряженности магнитных полей промышленной частоты на электрических станциях и подстанциях.



**Рис. 1.20. Электрические и магнитные поля промышленной частоты на территории подстанции напряжением 380/130 кВ по результатам измерений:**

*a* – план подстанции; *б* – эпюры напряженности электрического поля;  
*в* – магнитная индукция по некоторым направлениям

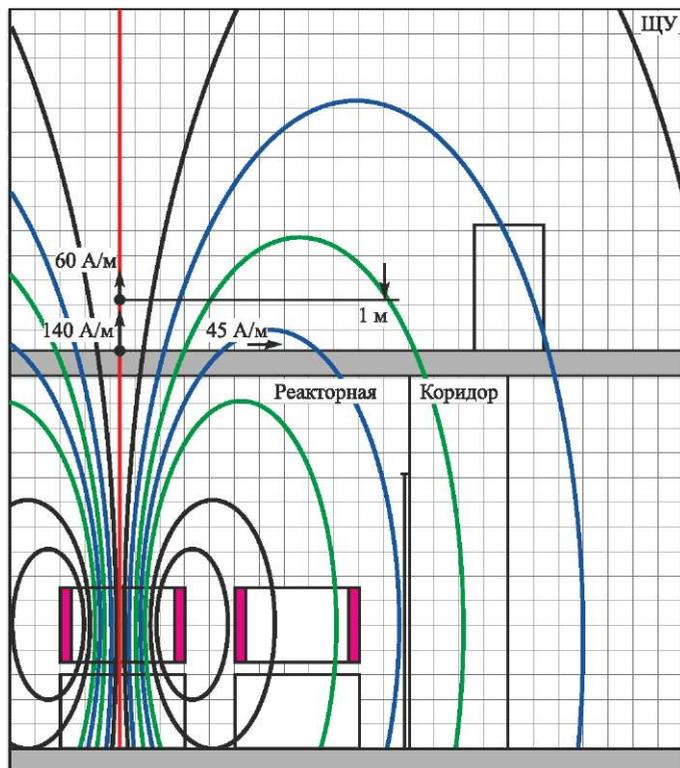


Рис. 1.21. Линия магнитного поля от токоограничивающего реактора

Таблица 1.8

**Напряженности магнитного поля промышленной частоты  
на промышленных предприятиях**

Предприятие, устройство	Место измерения	Напряженность, А/м
Электростанция	На расстоянии 0,3; 0,5; 1; 1,5 м от генераторных сборных шин с током 2,2 кА	36; 22; 12; 6,5
	Вблизи трансформатора мощностью 190 МВ · А, связывающего генератор с сетью ВН	6,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1; 1,5 м от ячейки распределительного устройства 6 кВ	13; 9; 4,3; 2,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1 м от трансформатора мощностью 0,6 МВ · А СН	14; 9,6; 4,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1 м от двигателя насоса мощностью 6 МВ · А с номинальным током 0,65 кА на стороне кабельного подвода СН	26; 15; 7
	В приборном помещении на расстоянии 0,3 м от многоканального записывающего устройства	10,7
	В диспетчерской на расстоянии 0,3 м от записывающего устройства	0,9

Предприятие, устройство	Место измерения	Напряженность, А/м
Линия электропередачи 400 кВ	Под проводами в середине пролета при токе 1 кА	10
Подстанция	Под сборными шинами 400 кВ вблизи присоединения линии с током 0,6 кА	9
	Под сборными шинами вблизи присоединения линии 200 кВ с током 0,5 кА	14
	В помещении с релейным оборудованием на расстоянии 0,1; 0,3 м от трансформаторов напряжения	7; 11
Электростанция на буром угле	На пульте управления на расстоянии 20 м от генератора	8
Электротяговая подстанция 16,67 Гц	В помещении с вычислительной техникой на расстоянии 16 м от распределительного устройства 15 кВ	4–6
	Непосредственно в РУ	До 80
Электролизное хлоргазовое устройство	В помещениях рядом с электролизным устройством	1600 постоянное поле с наложенным переменным полем напряженностью 4 А/м
Устройство для плавки алюминия	В помещениях на расстоянии 6 м от шин с током 100 кА	1200 постоянное поле

### 1.5. Радиочастотные поля

Радиопередатчики относятся к классу источников преднамеренного излучения. Примерами такого преднамеренного излучения являются радиовещательные передатчики, навигационные средства и устройства дистанционного управления.

В табл. 1.9 приведена информация по некоторым, официально разрешенным источникам преднамеренного излучения с указанием значений излучаемой мощности, типичным расстояниям от радиопередатчика до приемника в населенной местности и расчетной напряженности электрического поля. Для всех диапазонов, кроме диапазона волн ОНЧ (0,014–0,5 МГц), напряженность электрического поля дана для расстояний, превышающих зону поля электромагнитной индукции.

Значения напряженности электрического поля, приведенные в табл. 1.9 (согласно МЭК 61000-2-3), получены по выражению

$$E = k (\text{ЭИМ})^{0,5} r^{-1},$$

где  $r$  – минимальное расстояние, м; ЭИМ – эффективная излучаемая мощность, Вт;  $k$  – постоянная величина ( $k = 7$  для всех источников, кроме переговорных устройств, для которых  $k = 3$  (МЭК 61000-4-3)).

**Электрические поля,  
создаваемые некоторыми радиопередатчиками**

Источник	Частотный диапазон, МГц	Типичное максимальное эффективное значение излучаемой мощности, Вт	Типичное минимальное расстояние, м	Напряженность электрического поля в соответствующей точке, В/м
Радиотрансляция в диапазоне ДВ и в приморской зоне	0,014–0,5	$2,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$	5,5
Радиотрансляция в диапазоне СВ	0,2–1,6	$800 \cdot 10^3$	500	12,5
Любительские КВ-радиостанции	1,8–30	$1 \cdot 10^3$	10	22
КВ связь, включая радиотрансляцию	1,6–30	$10 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	0,1
«Гражданский» диапазон	27–28	12	10	2,5
Любительские радиостанции диапазона ОВЧ и УВЧ	50–52	$8 \cdot 10^3$	10	65
	144–146	$8 \cdot 10^3$		
	432–438	$8 \cdot 10^3$		
	1290–1300	$8 \cdot 10^3$		
Стационарные и мобильные средства связи	29–40	130	2	40
	68–87	130		
	146–174	130		
	422–432	130		
	438–470	130		
	860–990	130		
Портативные телефоны, включая сотовые и радиотелефоны	900–1900	5	0,5	30
Телевидение диапазона МВ (ОВЧ)	48–68	$320 \cdot 10^3$	500	8
	174–230	$320 \cdot 10^3$		
Радиотрансляция в диапазоне МВ (ОВЧ)	88–108	$100 \cdot 10^3$	250	9
Телевидение диапазона ДМВ (УВЧ)	470–853	$500 \cdot 10^3$	500	10
Радарные установки	1000–30 000	$10 \cdot 10^6$	200	110
Приемопередатчики (переносные)	27–1000	5	0,5	30

В рассматриваемой модели источник излучения – передающая антенна ведет себя как полуволновой диполь в дальней зоне излучения, в которой расстояние между источником излучения и точкой наблюдения больше, чем величина  $\lambda/2\pi$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения и она больше размеров источника излучения. В дальней зоне излучения выполняется отношение  $E/H \approx 377$  Ом в воздухе, где  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного полей.

В табл. 1.9 напряженности электрического поля приведены для радаров военного назначения. Эти значения рассчитаны для расстояния 200 м, так как электрические станции и подстанции могут располагаться вблизи мест использования таких радаров, например около моря.

Кроме устройств, указанных в табл. 1.9, существуют и другие устройства излучения электромагнитной энергии (например, охранные сигнализации и дистанционные пульты управления гаражными воротами). В таких устройствах, как правило, используют запрещенные радиодиапазоны с относительно малыми излучаемыми мощностями.

В составе силовых установок присутствуют и другие источники высокочастотных возмущений, например, двигатели, генераторы, силовые преобразователи, осветительные устройства, электронные системы и т.д.

Проведенные измерения показали, что на большинстве обследованных энергообъектов уровень напряженности поля радиочастотного диапазона не превышал допустимых для микропроцессорных устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами значений. В то же время на одной из подстанций Мосэнерго была зарегистрирована напряженность поля более 100 В/м на частоте около 1 МГц. Высокий уровень напряженности поля более 25 В/м был также зарегистрирован при использовании персоналом энергообъекта на релейном щите (расстояние от источника излучения – 3 м) стандартного радиопереговорного устройства на частоте 27 МГц.

## 1.6. Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Термин электромагнитный импульс ядерного взрыва включает в себя множество категорий электромагнитных импульсов (ЭМИ), в том числе, вызванных взрывами на поверхности Земли или в космическом пространстве. Высотные (выше 30 км) ядерные взрывы особенно опасны для объектов электроэнергетики. Они вызывают появление трех типов электромагнитных импульсов, которые могут проявить себя на поверхности Земли:

- первый ЭМИ высотного ядерного взрыва;
- второй ЭМИ высотного ядерного взрыва;
- третий магнитогидродинамический ЭМИ высотного ядерного взрыва.

Возникновение первого ЭМИ связано с отражением электронов Комптона, создаваемых X-излучением,  $\gamma$ -излучением и нейтронами при их взаимодействии с молекулами воздуха при ядерных взрывах на больших высотах (рис. 1.22).

Эти электроны когерентно отражаются магнитным полем Земли, так что поперечный поток электронов создает поперечное электрическое поле, распространяющееся по направлению к поверхности Земли.

Первый импульс характеризуется значительными пиковыми напряженностями электрического поля (десятки киловатт на метр), малой длительностью фронта (порядка единиц наносекунд), небольшой общей длительностью импульса (до сотен наносекунд).

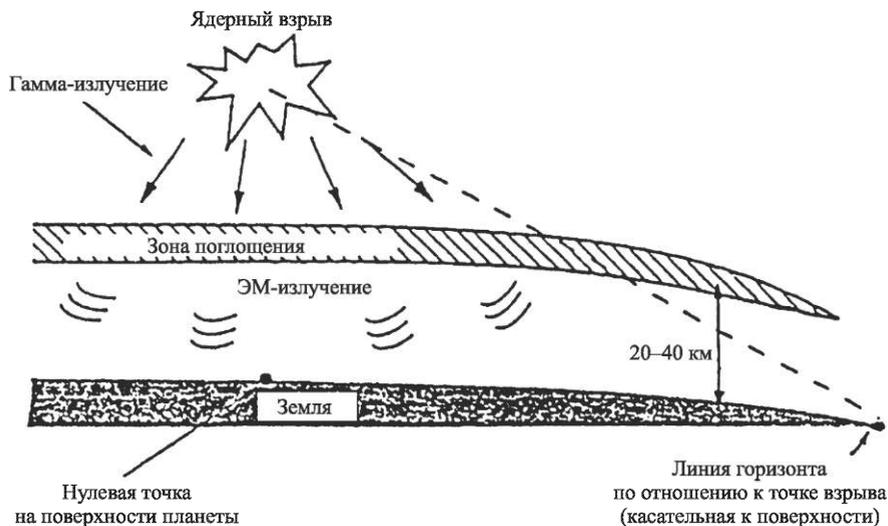


Рис. 1.22. Первый ЭМИ от высотного ядерного взрыва

Непосредственно за быстрым первоначальным переходным процессом излучаемое нейтронами рассеянное и жесткое гамма-излучение создает дополнительную ионизацию, приводящую к появлению второго ЭМИ.

Напряженность электрического поля этого импульса составляет от 10 до 100 В/м и может длиться от единиц до десятков миллисекунд.

Последний импульс, обычно называемый магнитогидродинамическим (МГД-ЭМИ), генерируется самим ядерным взрывом и характеризуется электрическим полем низкой амплитуды (порядка десятков милливольт на метр), длительным фронтом (порядка секунд) и длительным импульсом (сотни секунд).

Три вида ЭМИ высотного ядерного взрыва показаны на рис. 1.23 (публикация МЭК 1000-2-9 за 1996 г.). Общая напряженность электрического поля определяется как сумма составляющих

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) + E_3(t),$$

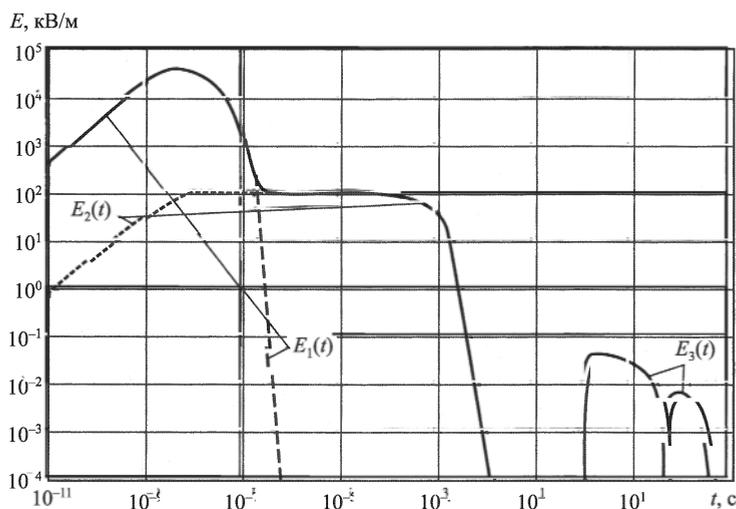
где  $E_1$  – напряженность первого ЭМИ высотного ядерного импульса;  $E_2$  – напряженность второго ЭМИ;  $E_3$  – напряженность МГД-ЭМИ.

Воздействие описанных ранее ЭМИ может представлять угрозу работе электроустановок при совпадении двух условий:

- ВЛ имеют достаточную длину для образования больших разностей потенциалов на их концах;
- на обоих концах ВЛ сопротивление заземлителя постоянному току небольшое, что создает возможность протекания по линии постоянных токов (при этом токи в несколько сотен ампер могут вызвать эффект насыщения сердечника трансформатора).

Благодаря своим свойствам МГД-ЭМИ могут взаимодействовать с ВЛ очень большой длины и наводить в них токи, вызывающие появление гармонических составляющих тока и дисбаланса фаз, которые, в свою очередь, могут серьезно повредить некоторые компоненты энергосистемы, например силовые трансформаторы. Поля, создаваемые МГД-ЭМИ, вызывают появление наведенных токов, подобных токам

в телефонных сетях (земляные токи), причиной появления которых являются магнитные бури, довольно часто случающиеся в северных странах.



**Рис. 1.23. Форма ЭМИ высотного ядерного взрыва:**

$E_1(t)$  – напряженность первого ЭМИ;  $E_2(t)$  – напряженность второго ЭМИ;  
 $E_3(t)$  – напряженность МГД-ЭМИ

## 1.7. Разряды статического электричества

Накопление заряда статического электричества на теле человека обычно имеет трибоэлектрическую природу. При этом электростатический заряд человека обусловлен трением двух материалов, один из которых является непроводящим (пластик, синтетика).

Первичные источники статического электричества приведены в табл. 1.10.

В общем случае величина заряда статического электричества объекта зависит от следующих факторов:

- уровня относительной влажности воздуха (при повышенной влажности воздуха заряд стекает быстрее);
- сопротивления изоляции и диэлектрической проницаемости диэлектрика – подошвы обуви, ковра, одежды, покрышек колес и другого отделяющего заряженный объект от проводящей поверхности;
- электрической емкости объекта, включая человека, относительно земли;
- ритмичности шагов при движении и скорости перемещения человека;
- сопротивления кожи человека (с учетом потоотделения);
- поверхностного давления между двумя взаимодействующими материалами.

В зависимости от условий окружающей среды потенциал человека может достигать величин 10–25 кВ, а запасенная энергия составляет несколько миллиджоулей. Типичные потенциалы приведены в табл. 1.11.

На рис. 1.24 приведены зависимости потенциала, обусловленного зарядом статического электричества человека, от относительной влажности воздуха.

Разряд статического электричества с тела человека может вызывать протекание кратковременных импульсов тока (длительность фронта от сотен пикосекунд

до нескольких наносекунд) с амплитудой в несколько десятков ампер и длительностью импульса до 100 нс; параметры тока зависят от уровня напряжений и параметров цепи разряда.

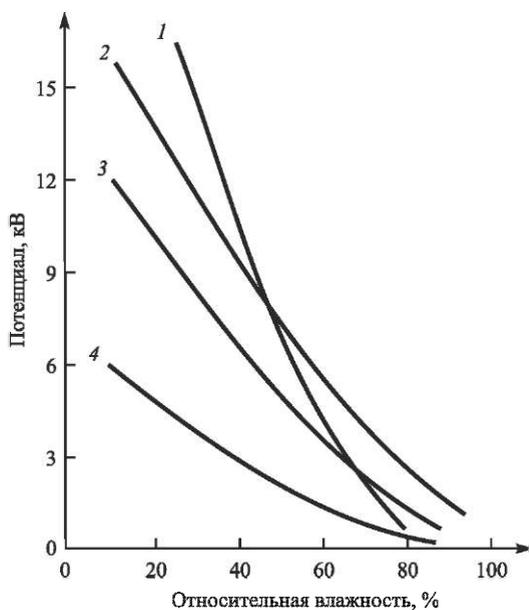
Таблица 1.10

### Первичные источники статического электричества

Предмет	Материал
Рабочие столы	Покрытые пластиком, лакированные или натертые мастикой поверхности
Рабочие стулья	Пластик, фибергласс, лакированные деревянные поверхности, дедероновые чехлы, мягкая сбивка на основе пенорезины, незаземленные металлические стулья
Полы	Лакированные бетон, натертое дерево, пластиковые покрытия, каменные плиты, ковры из синтетических материалов
Одежда	Рабочая и прочая одежда из синтетических материалов, хлопка, не подлежащая глажению, обувь с креповой или резиновой подошвой
Упаковка, тара	Коробки, клясеры, футляры, чехлы, кожанки, сумки, пакеты и упаковочные материалы из пластмассы
Инструмент	Инструмент с пластмассовыми ручками, незаземленные работающие паяльники, оксидированные алюминиевые и анодированные металлические поверхности, всасывающие патрубки из пластика, щетки и кисти с синтетической щетиной, изолированные каретки в устройствах поточной пайки, испаряющийся флюс
Документация, бумага, письменные принадлежности	Бумага любого вида, фотокопии, фольга, пищащие приборы из пластика

**Рис. 1.24. Зависимости потенциала зарядов статического электричества человека от относительной влажности воздуха:**

1 – при проходе по резиновому мату на расстояние 6 м; 2 – при поднятии пластикового пакета с верстака; 3 – при проходе по виниловому полу на расстояние 6 м; 4 – при вставании со стула

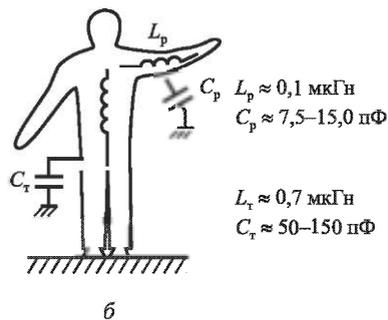
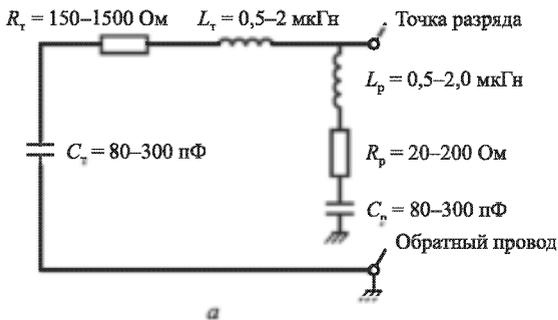


**Потенциалы, обусловленные зарядами статического электричества,  
измеренные при относительной влажности воздуха 24 %  
и температуре воздуха 21°**

Причина возникновения	Производственное помещение	Потенциал, В
Человек, идущий по полу с поливинилхлоридным покрытием	Монтажное	200–9000
Человек, работающий за верстаком	»	100–3000
Человек, держащий пластмассовую сумку перед верстаком	»	300–7000
Человек, заполняющий приемный бункер автоматического сортировочного устройства	»	100–2000
Извлечение пластиковой микросхемы из пластикового пакета	»	До 20 000
Извлечение пластиковой микросхемы из пенопластовой тары	»	До 11 000
Упаковка керамической микросхемы в пластмассовый футляр и извлечение из него	»	До 4000
Упаковка керамической микросхемы в пенопластовую тару и извлечение из нее	»	До 5000
Манипуляции с распаячным устройством из пластика	Ремонтная мастерская	500–1500
Размещение отдельных печатных плат в пластиковый чемодан	Испытательное помещение	100–800
Человек, идущий по нейлоновому ковру	Канцелярское помещение	10 000–15 000
Полиэфирная натертая сумка, положенная на верстак с поливинилхлоридным покрытием	Лаборатория	100–800 (2000 В при подъеме сумки на 10 см)

В процессе накопления заряда статического электричества человеческое тело проявляет себя как конденсатор емкостью от 100 до 200 пФ. Если человек во время заряда изменяет свое положение, то меняется его емкость относительно окружающих предметов и соответственно потенциал. Например, когда человек поднимается со стула, его емкость уменьшается, а потенциал соответственно увеличивается. Запасенная человеком энергия может превысить 1 мДж. Считается, что при разряде статического электричества человек обладает омическим сопротивлением величиной от 500 до 1500 Ом.

Схема замещения контура разряда с тела человека представлена в виде упрощенной модели разрядной цепи. Модель основана на разделении составляющих тока с тела человека (с параметрами  $R_B$ ,  $L_B$ ,  $C_B$ ) и его руки (с параметрами  $R_H$ ,  $L_H$ ,  $C_H$ ), (рис. 1.25). Указанная цепь руки/предплечья вызывает появление первоначальных пиков тока.



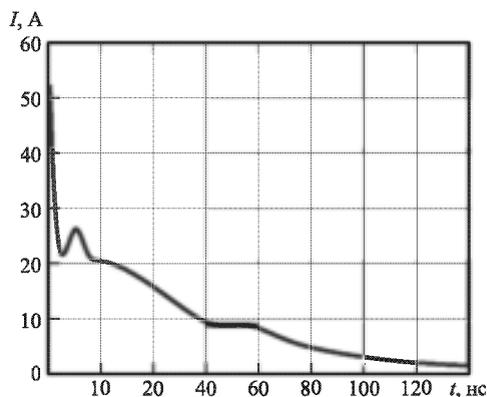
**Рис. 1.25. Расчетная схема на основе модели электростатического разряда с тела человека:**

*а* – модель электростатического разряда на основе двойной *RLC*-цепочки;  
*б* – модель человеческого тела для электростатического разряда  
(активные сопротивления для простоты опущены)

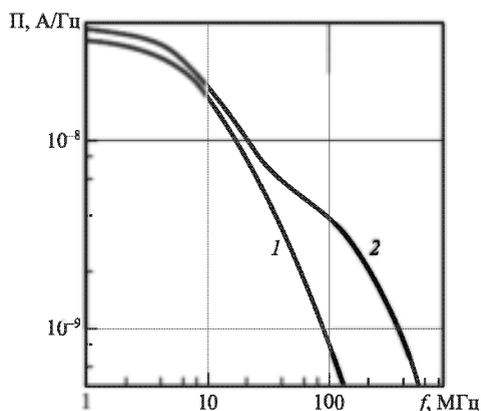
Разряд статического электричества с тела человека является чрезвычайно быстрым процессом. Иногда ток разряда состоит из весьма кратковременных предварительных импульсов, наложенных на начальную часть основного, длительного тока. Осциллограмма тока разряда с оператора, заряженного до потенциала 8 кВ показана на рис. 1.26. Полоса пропускания системы измерения составляла 1 ГГц.

Предварительные кратковременные импульсы тока появляются, в основном, при небольших зарядных напряжениях.

При анализе действия разряда как источника помех очень важно знать, есть ли предварительные пики тока. На рис. 1.27 показан спектральный состав полного импульса тока разряда статического электричества (суммы кратковременного и длительного токов). Наличие кратковременных составляющих тока увеличивает спектральную плотность в области высоких частот. Отсюда следует, что первоначальные кратковременные составляющие тока очень важны, так как большинство механизмов передачи помех являются высокочастотными.



**Рис. 1.26. Типичный ток разряда оператора через имеющийся в его руке металлический ключ**



**Рис. 1.27. Спектральный состав полного тока разряда статического электричества:**

*П* – плотность распределения амплитуд;  
*1* – длительная составляющая;  
*2* – полный импульс

Если зарядные потенциалы человека достигают величин, при которых возможен коронный разряд, то крутизна импульса тока разряда в значительной степени определяется скоростью приближения заряженного объекта к объекту разряда. Если сближение происходит достаточно быстро, фронт импульса тока имеет большую крутизну.

Наиболее сильное воздействие разрядов статического электричества получается, когда в руке или на руке имеется металлический предмет (ключ, отвертка, проводящие браслеты и т.д.). В этом случае крутизна тока, определяющая индуктированные напряжения помех, может достигать 100 А/нс.

Основными методами предотвращения вредного воздействия разрядов статического электричества и несанкционированного функционирования средств электроники являются исключение или ограничение накопления зарядов; отвод или нейтрализация неизбежно возникающих зарядов статического электричества; сведение к минимуму полевых и разрядных воздействий.

## **1.8. Электромагнитные помехи, вызванные магнитным полем Земли**

Протекание в энергосистемах токов, наведенных магнитным полем Земли, вызвано его изменениями. Первоисточником токов является Солнце, с поверхности которого при определенных условиях выбрасывается в окружающее пространство огромное количество заряженных частиц, суммирующихся с постоянным потоком подобных заряженных частиц от Солнца (солнечный ветер). Выбросы Солнцем заряженных частиц взаимосвязаны (хотя и не полностью) с циклом солнечных пятен. Иногда магнитные бури происходят из-за «дыр» в короне Солнца, создающих проколы в его поверхности. Наибольшие выбросы происходят при повышенной солнечной активности, а максимальный поток электронов достигается во время фазы уменьшения солнечной активности.

Когда излучаемые Солнцем заряженные частицы достигают Земли (по прошествии примерно трех дней с момента излучения), они отражаются магнитным полем нашей планеты. Взаимодействие между частицами и магнитным полем Земли приводит к появлению в ионосфере и магнитосфере кругового движения частиц вокруг магнитных полюсов. Токи, протекающие таким образом в ионосфере и магнитосфере Земли, могут вызывать магнитные возмущения и бури длительностью в несколько часов.

По статистике наведенное геоэлектрическое поле имеет наибольшее значение напряженности в направлении восток-запад, так как северный магнитный полюс Земли находится в Гренландии.

Наибольшая интенсивность геомагнитных возмущений наблюдается обычно ночью в виде северного и южного сияний. Однако возможны многочисленные исключения как по времени, так и месту появления магнитных бурь.

В случае, если энергосистема располагается в зоне северных или южных сияний и удельное сопротивление грунта достаточно велико, ТНМПЗ, являющиеся практически постоянными (частота составляет порядка нескольких мегагерц), могут иметь значительные амплитуды.

Токи, наведенные в электроустановках магнитным полем Земли, оказывают на них существенное влияние, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- удельное сопротивление грунта велико;

- система соединена с заземлителями с низким сопротивлением растеканию тока, по крайней мере, в двух точках; обычно такое имеет место, если сеть выполнена с эффективно или глухо заземленной нейтралью. В этих случаях длинные ВЛ подвергаются действию сравнительно высоких токов в несколько десятков ампер на фазу.

Действия токов, наведенных магнитным током Земли, вызывают:

- проблемы в работе силовых трансформаторов, при протекании по которым этих токов наступает быстрое насыщение магнитопровода. Как следствие, возможно повреждение трансформаторов из-за их перегрева, искажение напряжений и токов линий, а также потоков реактивной мощности в системе;
- появление гармонических составляющих токов и напряжений. Следствием этого факта может быть неправильная работа устройств управления и релейных защит. Кроме того, может повреждаться оборудование, работающее с изолированной нейтралью.

Подобные проблемы явились причиной повреждений в Северной Америке нескольких силовых трансформаторов и одного масштабного нарушения электроснабжения. На рис. 1.28 приведен пример изменения электрического поля напряженностью до 2 В/км во времени, вызванное изменением магнитного поля Земли. Это изменение магнитного поля явилось причиной нарушения электроснабжения системы Гидро-Квебек в Канаде.

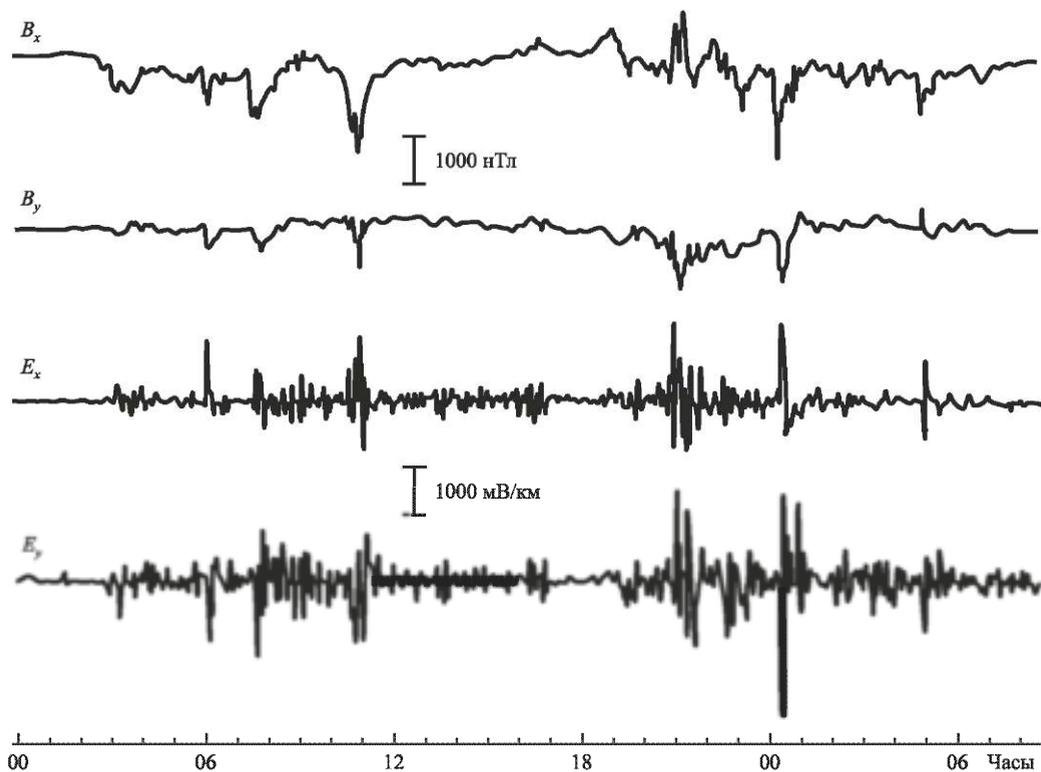
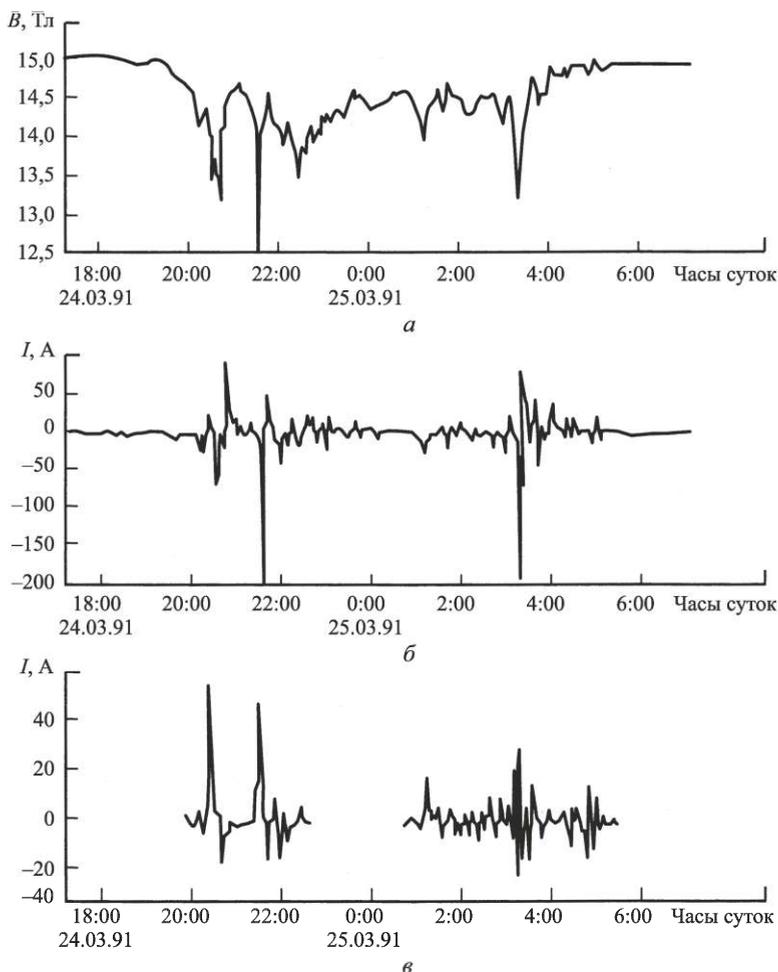


Рис. 1.28. Результаты измерений индукции магнитного поля Земли в провинции Оттава ( $B_y$ ) и соответствующие расчетные напряженности электрические поля  $E_y$ ,  $E_x$  и  $E_z$  (для Квебека)

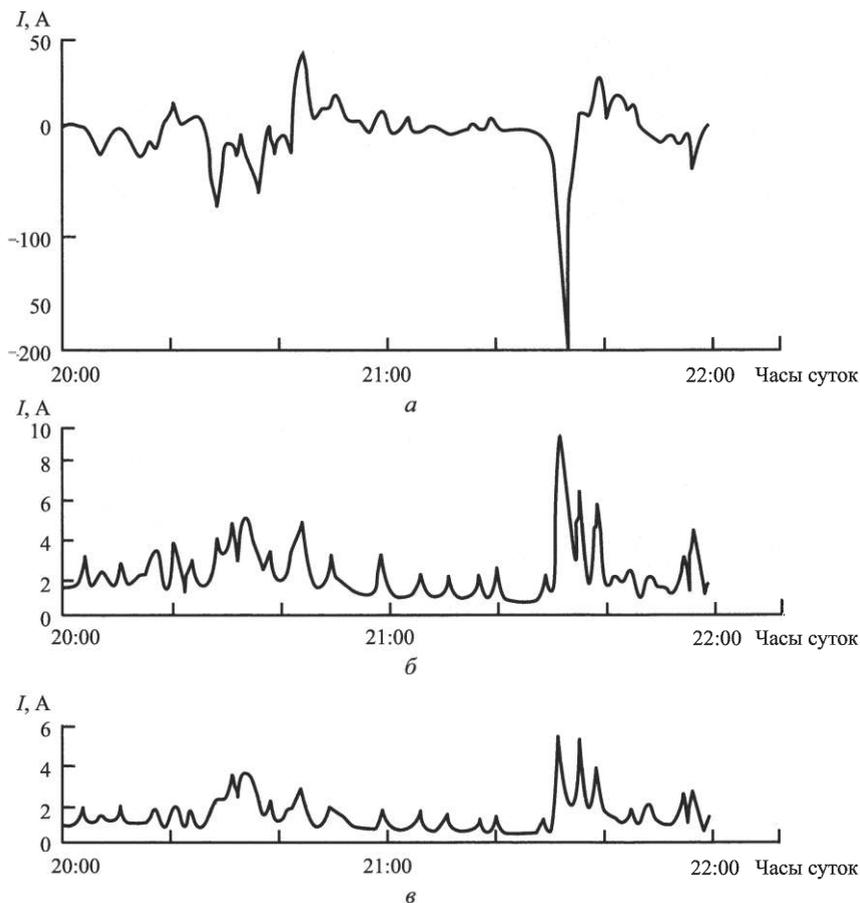
Был отмечен интересный факт: большее по амплитуде изменение напряженности магнитного поля тремя часами позже вызвало появление меньшего электрического поля вследствие меньшей скорости своего изменения. Последующие возмущения магнитного поля и связанное с ними электрическое поле также вызвали сбои в работе энергосистем в ряде мест всей Северной Америки. В результате в Северной энергосистеме произошло несколько нежелательных отключений трансформаторов и линий электропередачи.

На рис. 1.29 приведены осциллограммы более ранних измерений магнитного поля Земли в Финляндии. Осциллограммы возмущений в сети переменного тока, вызванные этими полями, показаны на рис. 1.30.



**Рис. 1.29. Взаимосвязь токов в заземляющем проводе силового трансформатора напряжением 400 кВ с магнитным полем Земли (Финляндия):**

*а* – изменение индукции геомагнитного поля на ПС Нурмиярве в северном направлении; *б* – соответствующие ему токи в заземляющем проводнике трансформатора 400 кВ на ПС Раума; *в* – то же на ПС Пирттикоски (измерения проводились 24 и 25 марта 1991 г.)



**Рис. 1.30. Токи в заземляющем проводе силового трансформатора напряжением 400 кВ, вызванные изменениями магнитного поля Земли (Финляндия):**

*а* – ток в линии переменного тока 400 кВ, подходящей к ПС Раума с севера; *б* – ток в линии переменного тока 400 кВ, подходящей к ПС Раума с юга; *в* – ток в нейтрали трансформатора ПС Раума (измерения проводились 24 марта 1991 г.)

### **Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите в порядке значимости источники электромагнитных воздействий на объектах электроэнергетики.
2. Дайте определение понятию «электромагнитная обстановка». Какими параметрами она характеризуется?
3. Назовите четыре разновидности электромагнитных помех, их изменение во времени, частотный спектр.
4. В чем состоит различие синфазных и противофазных электромагнитных помех?
5. Что определяет уровень полевых помех: крутизна или длительность импульса тока молнии?
6. Каковы возможные диапазоны значений параметров помех?
7. Чем характеризуются уровень и мера сигнала?
8. Каков механизм перенапряжений и помех на объектах электроэнергетики при ударах молнии?
9. В чем проявляется механизм воздействия прямых ударов молнии в ВЛ и подстанции ВН и СВН?

10. Каковы нормированные параметры тока молнии для трех уровней защиты объектов?
11. Объясните появление перенапряжений и помех при коммутациях в цепях высокого напряжения.
12. Каковы параметры напряженности электрических и магнитных полей в ОРУ и вблизи элегазовой ячейки на уровне земли для классов напряжений 115–500 кВ?
13. Какие опасности для технических средств создают электрические и магнитные поля промышленной частоты?
14. Назовите источники радиочастотных помех и их характеристики
15. Охарактеризуйте параметры трех видов электромагнитных импульсов при ядерных взрывах.
16. В чем состоит опасность статического электричества для технических средств разрядов?
17. Каким образом проявляются помехи, вызванные магнитным полем Земли?

## ГЛАВА 2

---

---

# КАНАЛЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И СПОСОБЫ ИХ ОСЛАБЛЕНИЯ

---

---

### 2.1. Моделирование механизмов связи

Все модели, описывающие связь электромагнитного поля с автоматическими и автоматизированными системами технологического управления электротехническими объектами, могут быть построены с применением *теории антенн*. Основу этой теории составляют уравнения Максвелла, представляемые в форме наиболее часто используемой для реализации численных методов расчетов.

Данная теория основана на том основном принципе, что любой ток является источником поля (задача излучения) и любое поле может быть источником тока (задача приема), который, в свою очередь, является источником излучаемого поля.

Указанный подход приводит к появлению интегральных уравнений, описывающих поведение проводящего тела, подверженного воздействию падающей волны электромагнитного поля. Данные уравнения в общем случае не имеют аналитического решения и требуют применения численных методов.

Теория антенн является одной из наиболее общих и строгих из используемых теорий для решения задач определения параметров механизмов связи и поэтому содержит мало допущений, а именно:

- электропроводящее тело имеет размеры много меньшие длины волны;
- тело обладает абсолютной проводимостью.

Однако расчеты с применением данной теории требуют большого времени и значительных объемов памяти компьютера.

Другой, широко используемой является *теория длинных линий* (ТЛ). Эта теория основывается на следующих допущениях:

- диаметр проводников и расстояние между ними (или между проводником и землей) меньше длины волны;
- между токами, протекающими по различным элементам линии, отсутствует взаимное влияние, наведенные токи не влияют друг на друга посредством излучения (предполагается, что линия более или менее прямолинейна).

При помощи теории линий можно получить быстрое и точное решение задач, связанных со взаимодействием кабелей и линий.

Частным случаем двух достаточно общих теорий является третья, более простая, квазистатическая теория, или *теория цепей*, иногда также известная как теория Кирхгофа или теория Ленца, так как ее основой являются законы Кирхгофа и Ленца.

Эта теория требует для своего применения выполнения следующих ограничений:

- длина цепи много меньше длины волны, т.е. отсутствует эффект распространения (волновой эффект);
- ток остается неизменным в пределах каждого элемента цепи.

При выполнении этих условий цепь может быть представлена сосредоточенными элементами (не имеющими размеров), соединенными последовательно или параллельно в сеть, состоящую из узлов и ветвей, для которой составляются уравнения Кирхгофа.

Магнитный поток, пересекающий контур, учитывается введением сосредоточенного элемента в виде индуктивности.

Все эти допущения ограничивают распространение (по крайней мере, количественно) полученных выводов теории цепей на длинные цепи (длина которых сравнима с длиной волны). Для таких цепей требуется либо обращение к более общим теориям, либо использование эмпирических законов или законов статистики.

Одним из основных преимуществ теории цепей является простота вычислений, для которых не требуется применения численных методов. Вследствие этого механизм связи может быть рассмотрен при небольших размерах цепи. Более того, отпадает необходимость в расчете электромагнитных полей и построении соответствующей модели, а их источник всегда представляется в виде тока или напряжения. Таким образом, модель может быть использована для описания непосредственного контакта с источником возмущения (источником тока или напряжения, введенным непосредственно в сеть) или косвенного взаимодействия посредством электрического или магнитного поля.

По указанным причинам большинство механизмов передачи помех представляют на основе теории цепей.

## **2.2. Упрощенные модели передачи электромагнитных помех и методы их снижения**

При анализе путей передачи возмущений от источника к приемнику их следует разделить на две группы: механизм связи образуется посредством прямого электрического контакта между источником и приемником или посредством электромагнитного поля (отдельно электрической или отдельно магнитной составляющей, или их совместным воздействием).

Таким образом, может быть сделано первое разделение (классификация) способов передачи помех: *гальванические (кондуктивные) связи и связи излучением (полевые связи)*.

Однако, когда возмущение воздействует на приемник посредством гальванической связи, его воздействие на чувствительные цепи может происходить по-разному, в зависимости от типа сопротивления (активное или реактивное, собственное или взаимное), по которому протекает ток.

Хотя иногда при передаче возмущения происходит комбинация различных физических механизмов воздействия, будем в дальнейшем использовать понятие *связь через полное сопротивление*, понимая при этом, что при очень низких частотах или при чисто активном характере сопротивления данный способ взаимосвязи может быть назван *связью через активное сопротивление*.

Способы взаимосвязи без гальванического контакта будем подразделять на три различные категории в зависимости от того, могут ли электрическая и магнитная составляющие магнитного поля рассматриваться отдельно или необходимо их совместное рассмотрение.

Предложена следующая классификация способов передачи возмущений:

- связь через общее сопротивление (в том числе через активное сопротивление);
- индуктивная, или магнитная связь (магнитное поле в ближней зоне);
- емкостная, или электрическая связь (электрическое поле в ближней зоне);
- связь излучением, или электромагнитная связь (поле в дальней зоне).

Теория цепей может быть применена для рассмотрения только трех первых видов взаимосвязи. Четвертый способ требует для своего рассмотрения применения одной из более общих теорий.

В действительности ни один из указанных видов связи не существует в отдельности, однако обычно в диапазоне низких или средних частот один из них превалирует над остальными.

Для всех механизмов связи возможно определить *передаточную функцию* между источником энергии и оборудованием, подверженным помехе, или приемником.

Передаточная функция может представлять собой полное сопротивление, полную проводимость или безразмерную величину, в зависимости от типа приложенной величины (тока или напряжения) и результата ее действия на цепь.

Во всех случаях электромагнитное взаимодействие между источником ( $E_{\text{н}}$ ,  $Z_{\text{н}}$ ) и приемником ( $U_{\text{пр}}$ ,  $Z_{\text{пр}}$ ) может быть смоделировано четырехполюсником (рис. 2.1), причем в наиболее простых случаях – Т-образной схемой замещения, содержащей полные сопротивления  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_{\text{общ}}$ .

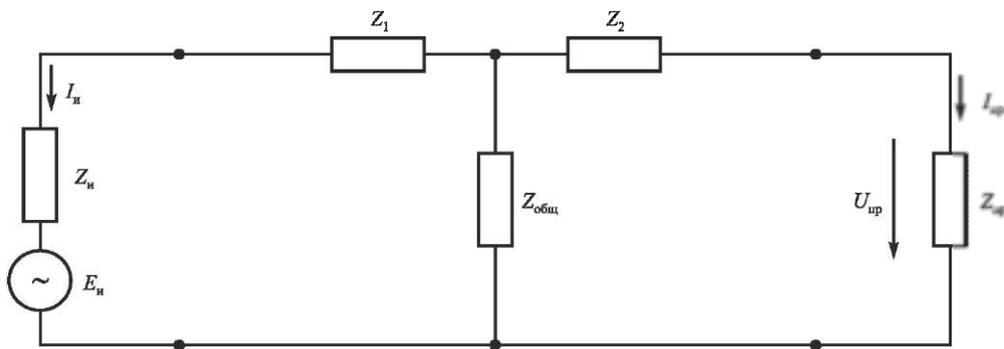


Рис. 2.1. Схема замещения источника возмущения ( $E_{\text{н}}$ ,  $Z_{\text{н}}$ ) и приемника ( $U_{\text{пр}}$ ,  $Z_{\text{пр}}$ ) электромагнитного взаимодействия с элементами связи  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_{\text{общ}}$

На этом и последующих рисунках, символ  $E$  (в случае, если отсутствует понимание его как обозначение напряженности электрического поля) используется для обозначения источника напряжения, а символ  $U$  для обозначения падения напряжения или наведенной ЭДС. Данная модель, в которой обратным проводом обычно является земля, предполагает два направления для снижения коэффициента взаимосвязи между источником и приемником: *короткозамкнутая цепь* и *разомкнутая цепь*.

Очевидно, что если сопротивление  $Z_{\text{общ}}$  равно нулю, энергия из источника не может быть передана приемнику. Аналогично, если какое-либо из сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$  (или же оба) бесконечно велики (т.е. цепь разомкнута), приемник также не может получить энергию из источника. Следует отметить, что идеально короткозамкнутую или разомкнутую цепь создать невозможно, так как даже при наилучшем исполнении существуют паразитные индуктивности и емкости.

Создание короткозамкнутой цепи предполагает уменьшение сопротивления всех заземляющих проводников и, в частности, их индуктивности, влияние которой становится наиболее заметным при высоких частотах.

Создание разомкнутой цепи подразумевает изолирование приемника от источника либо через увеличение расстояния между ними, либо введением искусственных преград на пути помех (уменьшение коэффициента связи), либо созданием отдельных сетей заземления с присоединением к земле в одной точке.

Количественно возмущения обычно характеризуют значением напряжения на оборудовании, а оно часто является результатом протекания токов в элементах заземляющих или экранирующих устройств.

### 2.3. Связь через общее полное сопротивление

Этот вид связи возникает, когда разные цепи имеют в своем составе одно или несколько общих сопротивлений.

Простейшим и наиболее общим случаем такой связи являются цепи, имеющие общий обратный провод, обычно являющийся сетью заземления, причем предполагается, что он не идеален, т.е. имеет отличное от нуля сопротивление. На рис. 2.2 приведен пример такой цепи, состоящей из двух контуров.

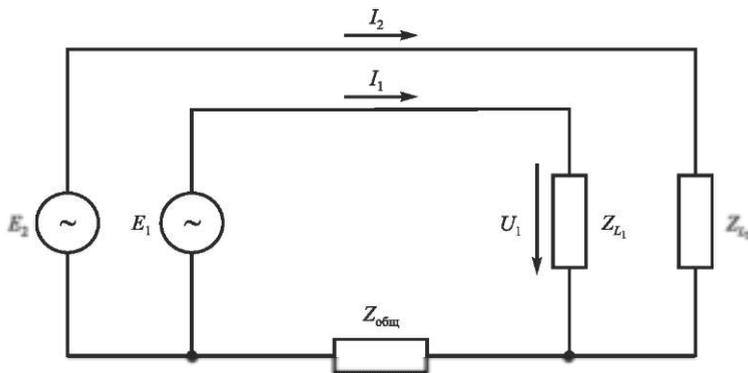


Рис. 2.2. Связь через общее полное сопротивление:

$$U_1 = (E_1 - I_2 Z_{\text{общ}}) \frac{Z_{L_1}}{Z_{L_1} + Z_{\text{общ}}}, Z_{L_2} \gg Z_{\text{общ}}$$

Благодаря наличию общего сопротивления  $Z_{\text{общ}}$  падение напряжения на сопротивлении нагрузки контура  $E_1$ ,  $Z_{L_1}$  представляет собой алгебраическую сумму полезной ЭДС  $E_1$  и напряжения помехи, вызванной протеканием тока в контуре  $E_2$ ,  $Z_{L_2}$ , поскольку сопротивление  $Z_{L_1}$  обычно намного больше общего сопротивления  $Z_{\text{общ}}$ . Таким образом, напряжение помехи составляет величину  $Z_{\text{общ}} I_2$ , где  $Z_{\text{общ}}$  соответствует передаточной функции, и в данном случае может быть названо *передаточным сопротивлением*.

Существует два возможных пути ослабления связи через общее полное сопротивление без воздействия на источники помех:

- устранение общего обратного провода (стратегия разомкнутой цепи);
- уменьшение полного сопротивления обратного провода (стратегия короткозамкнутой цепи).

Интересно отметить, что при рассмотрении контуров заземления, эти два метода иногда приводят к диаметрально противоположным результатам:

- устранение общего обратного провода эквивалентно задаче обеспечения каждой сети не более одного присоединения к земле, что ведет к концепции радиальной схемы заземления (схемы заземления звездой);
- уменьшение сопротивления обратного провода, напротив, означает увеличение числа проводников (так как простое увеличение сечения проводника слабо влияет на его индуктивность), увеличение количества точек заземления ведет к образованию сложноточечной сети заземления.

Очевидное противоречие между двумя подходами может быть устранено, если сделать разделение между заземлением активных цепей, переносящих полезный сигнал и заземлением металлических корпусов и экранирующих цепей.

Стратегию разомкнутой цепи следует применять к активным цепям: общие обратные провода в активных цепях следует (по возможности) устранить. Такие цепи следует заземлять в одной точке.

С другой стороны, стратегия короткозамкнутой цепи применяется в оставшемся большинстве случаев, в частности при заземлении всевозможных экранов.

Существуют два важных исключения, для которых связь через общее полное сопротивление не может быть устранена. Это – сети электроснабжения и связи коаксиальными кабелями.

Однако для сетей с коаксиальными кабелями (как и для всех цепей переменного тока) может быть достигнуто естественное устранение рассматриваемой связи, посредством уменьшения площади петли каждой цепи, как показано на рис. 2.3, где приведен план пространственного расположения двух цепей с тремя возможными обратными проводниками с сопротивлениями  $Z_1$ ,  $Z_{\text{общ}}$  и  $Z_2$ , по которым даже при практическом равенстве их поперечных сечений и длин будут протекать разные токи. Переменный ток  $I_1$  большей частью будет возвращаться по проводнику  $Z_1$ , переменный ток  $I_2$ , будет возвращаться преимущественно по проводнику  $Z_2$ , а в проводнике  $Z_{\text{общ}}$  ток будет практически отсутствовать.

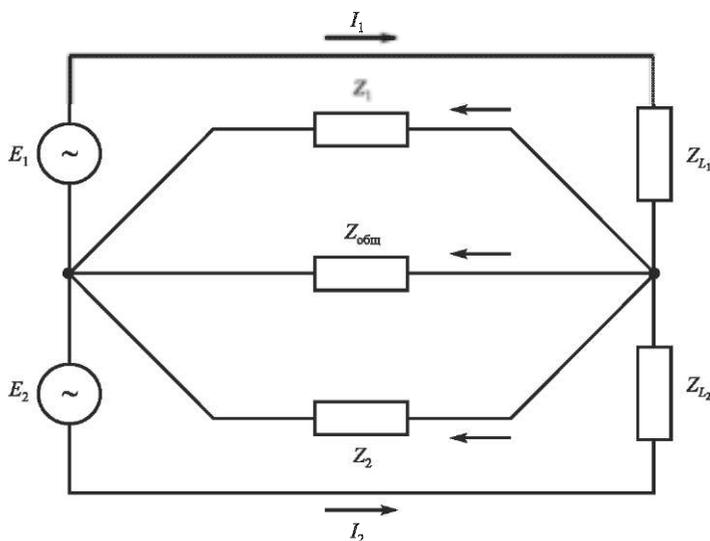
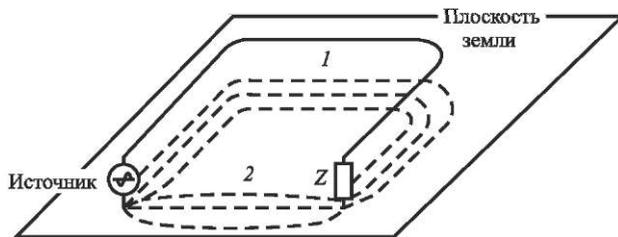


Рис. 2.3. Естественное устранение связи цепей с общим полным сопротивлением на переменном токе

Это явление, которое является частным случаем индуктивной связи, заметно даже на частоте 50 Гц. Например, когда на линии высокого напряжения происходит КЗ на землю, ток большей частью возвращается в источник по линии, а не по прямому пути между местом КЗ и источником (рис. 2.4).



**Рис. 2.4. Пути протекания обратного постоянного и переменного тока в земле**

На этом и большинстве последующих рисунков цепь представлена в виде двух- или трехмерного изображения, на которое согласно теории цепей нанесены сосредоточенные элементы для того, чтобы показать их взаимные индуктивности.

Данный подход учитывает так называемый эффект близости, а на высоких частотах – и поверхностный эффект. Благодаря этим важным эффектам становится возможным создание высокочастотных сетей с множественным заземлением, в которых помехи, создаваемые токами внешних возмущений, практически отсутствуют.

Данный подход магнитного подавления рассмотрен в гл. 3.

Примеры помех, передаваемых посредством общего полного сопротивления:

- от токов КЗ частотой 50/60 Гц в заземлителе, используемом в качестве плоскости нулевого потенциала;
- при прямом попадании молнии в контур заземления, цепи или оборудование, например в антенны;
- при разряде статического электричества непосредственно на оборудование;
- перекрестные помехи между цепями, имеющими общее сопротивление;
- гармонические составляющие, колебания и провалы напряжения в цепях электропитания.

## 2.4. Магнитная связь

Магнитная (индуктивность) связь, наряду со связью через общее полное сопротивление, является наиболее часто встречающимся видом проникновения помех. Данная связь имеет место в любом случае, когда две цепи имеют общий магнитный поток. Обычно таким случаем является ситуация, когда земля является частью обеих цепей и, по крайней мере, по одному проводнику протекает ток.

В простейшем случае связь образуется между двумя параллельными проводниками, расположенными над поверхностью земли, которая служит обратным проводом для обоих контуров (рис. 2.5).

Предположим, что цепь  $E_2 - R_2 - L_2 - Z_{L_2}$  является источником возмущения, цепь  $E_1 - R_1 - L_1 - Z_{L_1}$  – приемником, а полезный сигнал (ток) в этой цепи много меньше, чем ток цепи, создающий помеху, вследствие чего его влиянием на вторую цепь можно

пренебречь. Темная зона представляет собой площадь, пронизываемую общим магнитным потоком и определяющую таким образом величину взаимной индуктивности  $M$  между двумя контурами.

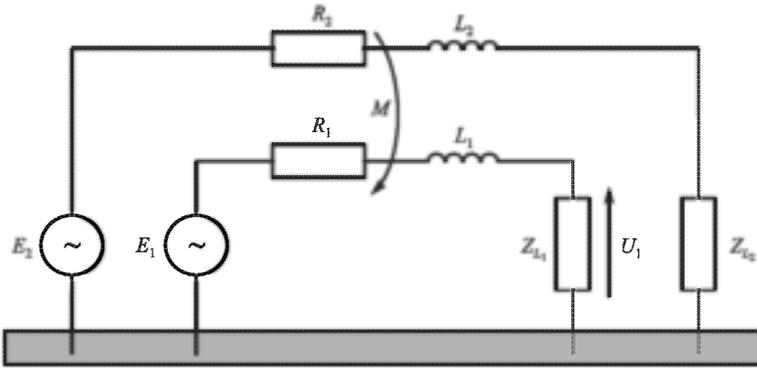


Рис. 2.5. Индуктивная связь:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1; \quad Z_2 = R_2 + j\omega L_2; \quad U_1 = (E_1 + I_2 j\omega M) \frac{Z_{L_2}}{Z_{L_1} + Z_1}$$

Решение уравнений, описывающих данную цепь, показывает, что напряжение  $U_1$  является суммой напряжения полезного сигнала  $E_1 Z_{L_2} / (Z_{L_1} + Z_1)$  и индуцированного напряжения помехи  $j\omega M I_2 Z_{L_2} / (Z_{L_1} + Z_1)$ .

Если два контура расположены вблизи друг от друга, то величина  $M$  приближается к значению  $L_1$ , что при сравнении выражения на рис. 2.5 с выражением на рис. 2.2 позволяет утверждать, что величина  $j\omega M$  играет здесь ту же роль, что и  $Z_C$ . Это говорит о том, что механизмы связи через общее полное сопротивление и посредством взаимной индуктивности иногда трудно различимы.

На самом же деле, различие является искусственным и связано с особенностями теории цепей. Сложность при использовании теории цепей состоит в том, что применение второго закона Кирхгофа

$$\sum u_n = 0 \text{ вместо } \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

подразумевает, что выражение  $\partial \Phi / \partial t$  заменяется на  $L di/dt$  ( $M di/dt$ ).

Отсюда вытекает требование о том, что индуктивность  $L$  может быть определена только для замкнутого контура (т.е. цепи), сцепленного с магнитным потоком  $\Phi$ .

Данное утверждение приводит к следующим важным выводам:

- падение напряжения между двумя точками в пространстве нельзя определить однозначно, так как оно зависит от пути, используемого для проведения измерений;
- наведенные напряжения не могут быть сосредоточены в какой-либо части обмотки (исключением является падение напряжения между выводами катушки индуктивности, так как считается, что магнитный поток внутри сердечника много больше внешнего потока);
- индуктивность свойственна только замкнутой петле. Однако можно однозначно наделить индуктивностью часть петли.

В действительности же, основным понятием, о котором следует помнить, имея дело с понятиями собственной или взаимной индуктивности цепи, является отношение

магнитного потока, создаваемого цепью или сцепленный с ней, к току. Понятие магнитного потока универсально и не связано ни с какими упрощенными теориями. Данное понятие может быть применено вне зависимости от частоты колебаний поля и размеров цепи.

Сделав подобные выводы, можем задаться вопросом: а правомерно ли говорить об индуктивности одиночного провода?

Падение напряжения между двумя точками цепи зависит от пути измерения. Пусть имеется труба и три цепи измерения падения напряжения на ней (рис. 2.6).

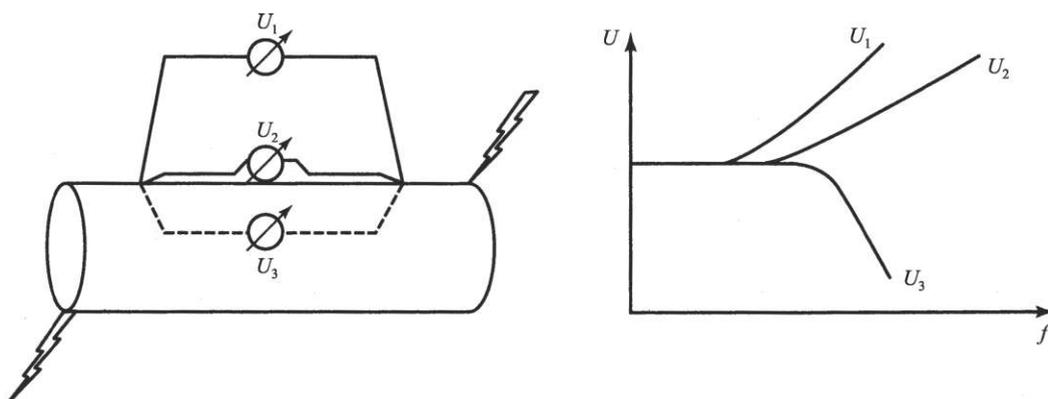


Рис. 2.6. Определение падения напряжения между двумя точками цепи

*Контур измерения 1.* Измеряются сумма падений напряжений  $U_1$  на активном сопротивлении трубы и ЭДС, наведенная во внешней петле.

*Контур измерения 2.* Измеряется только резистивное падение напряжения  $U_2$  (на внешней поверхности трубы), увеличивающееся на высоких частотах вследствие поверхностного эффекта.

*Контур измерения 3.* Измеряется падение напряжения на внутренней поверхности трубы  $U_3$ . Так как с увеличением частоты ток вытесняется на поверхность трубы, то падение напряжения  $U_3$  также уменьшается. Вследствие того, что магнитное поле не проникает внутрь трубы, отсутствует наведенная (как в первом случае) ЭДС.

В научно-технической литературе часто встречаются значения погонной индуктивности одиночного провода – 1–2 мкГн/м. Что под этим подразумевается?

Чтобы разобраться необходимо обратиться к формуле для расчета погонной индуктивности двух бесконечно длинных параллельных проводников.

Индуктивность бесконечно длинного провода радиусом  $r$ , расположенного на высоте  $h$  над абсолютно проводящей поверхностью земли, может быть рассчитана

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}.$$

Принимая радиус провода равным 5 мм и варьируя высоту провода над поверхностью земли в диапазоне от 25 см до 25 м, что эквивалентно размещению обратного провода, т.е. отражению проводника в земле, на расстоянии от 0,5 до 50 м, получим, что при  $\mu = \mu_0$  значение индуктивности петли находится в диапазоне от 0,9 до 1,8 мкГн/м.

На практике это означает, что при рассмотрении вопросов ЭМС, когда обратный провод находится на расстоянии, много большем радиуса проводника (или эквивалентного радиуса – при рассмотрении кабеля), можно говорить об индуктивности (в действительности о собственной индуктивности) величиной  $1 \text{ мкГн/м}$ .

Вернемся к первоначальной теме изложения – проблеме магнитной связи и рассмотрим возможные пути ее ослабления.

**Использование симметричных цепей и уменьшение площади петли (стратегия разомкнутой цепи).** Устранение общих обратных проводов и уменьшение площади петли может быть достигнуто посредством симметрирования контура  $l$  по отношению к земле (рис. 2.7), т.е. созданием *симметричной цепи*.

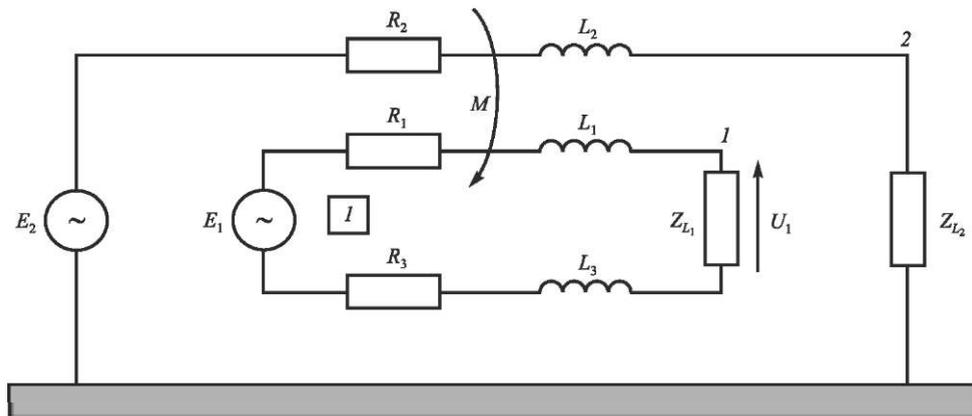


Рис. 2.7 Ослабление индуктивной связи созданием симметричной цепи

Напряжения, создаваемые между проводниками симметричной цепи, относятся к противофазным напряжениям иногда называемым напряжением *дифференциального типа, нормального типа*, в отличие от синфазных напряжений, возникающих между проводниками и землей, которые иногда называют напряжениями *общего вида, продольными напряжениями*.

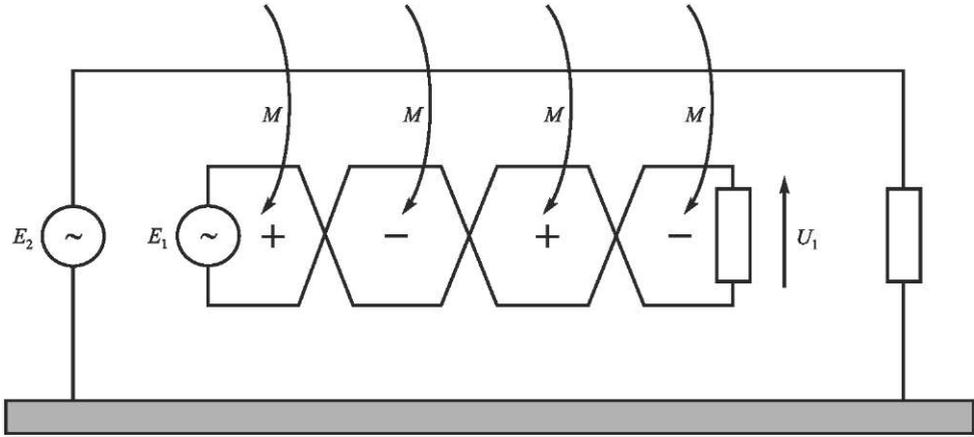
Отношение напряжения помехи в цепи с отдельным обратным проводом к напряжению помехи, наводимому в цепи с общим обратным проводом, выраженное в децибелах, в литературе по системам связи носит название *коэффициента продольных потерь на преобразование*, а в теории цепей – *коэффициента снижения помехи общего вида*. Количественно он сильно зависит от несимметричности цепи (линии и оконечного оборудования) по отношению к земле.

Наилучшим методом для симметрирования цепи является применение витых пар. В этом случае ЭДС, наводимые в каждой петле, компенсируют друг друга (рис. 2.8).

Эффект ослабления помехи от применения витой пары (по отношению к обычным проводам) растет с увеличением числа витков на единицу длины и с увеличением длины кабеля, и падает при увеличении сопротивления нагрузки.

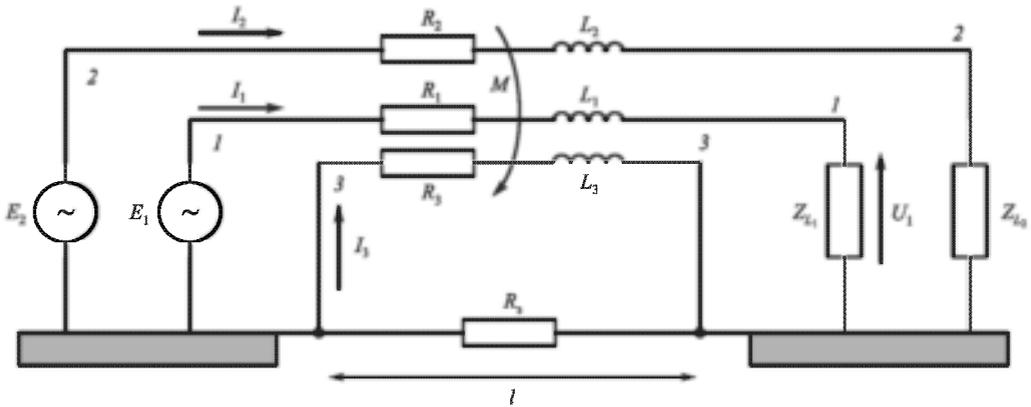
На низких частотах возможно снижение уровня помех более, чем в 100 раз (на 40 дБ), при расстоянии между двумя последовательными перестановками проводов 5 см. Большее снижение помех становится затруднительным, вследствие небольшой асимметрии внутри самого кабеля и на его концах. Более того, при частотах более 100 кГц польза от использования витой пары уменьшается и почти совсем пропадает

при частотах выше нескольких мегагерц. Что касается численных значений коэффициента ослабления, то они варьируются (для одиночной витой пары) от 90 дБ на низких частотах до 30 дБ на частоте 1 МГц.



**Рис. 2.8. Дополнительное ослабление индуктивной связи при помощи витой пары**

**Экранирование.** Другим способом ослабления индуктивной связи между контурами 1 и 2 является прокладка рядом с проводниками короткозамкнутого контура 3, сцепленного с магнитным потоком контура 1 (или 2) (рис. 2.9).



**Рис. 2.9. Экранирование магнитного поля при помощи заземленного проводника**

Контур 3 взаимодействует с магнитным потоком подобно короткозамкнутой вторичной обмотке трансформатора. В соответствии с законом Ленца ток в третьем контуре  $I_3$  вызывает появление магнитного потока той же величины, что и вызвавший его поток, но противоположного знака, и, следовательно, компенсирует его.

Единственный способ удостовериться, что потоки, охватываемые контурами 1 и 3 (или 2 и 3), одинаковы, это использовать в качестве третьего проводника трубку, окружающую проводник 1 или 2. Таким образом, получается экран заземленный на обоих концах (рис. 2.10).

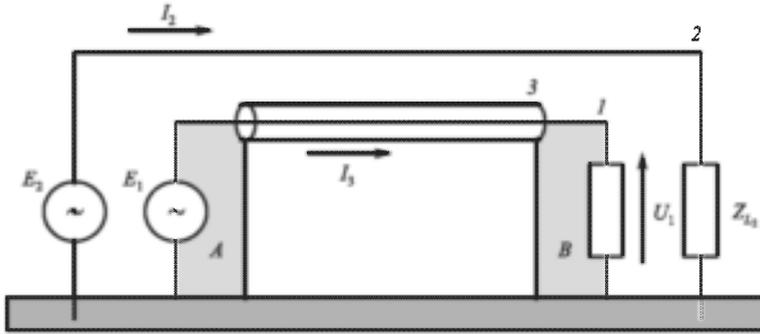


Рис. 2.10. Экранирующее действие трубчатого проводника, окружающего цепь приемника

**Экранирование цепи приемника помехи.** Рассмотрим более детально эффективность такого экранирования для схемы (см. рис. 2.10), для чего получим решение уравнений цепи (см. рис. 2.9). Для простоты предположим, что  $E_1 = 0$  и  $Z_{L1} = \infty$ , т.е. током  $I_1$  по сравнению с  $I_2$  и  $I_3$  можно пренебречь:

$$\begin{cases} Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 = U_1; \\ Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 = 0; \end{cases} \quad (2.1)$$

$$U_1 = \left( Z_{12} - \frac{Z_{13}Z_{32}}{Z_{33}} \right) I_2. \quad (2.2)$$

Здесь

$$Z_{ij} = R_{ij} + j\omega M_{ij} (i \neq j);$$

$$Z_{32} = R_3 + j\omega M_{32};$$

$$Z_{33} = R_3 + R_3 + j\omega L_3.$$

Если проводник 3 расположен очень близко к проводнику 1, то магнитные потоки, сцепленные с обсами цепями, почти одинаковы. Отсюда следует, что  $M_{12} = M_{32}$  и  $Z_{12} = Z_{32}$ .

Из (2.2) следует

$$U_1 = Z_{12}I_2 \frac{Z_{33} - Z_{13}}{Z_{33}}, \quad (2.3)$$

или

$$U_1 = Z_{12}I_2 \frac{R_3 + j\omega(L_3 - M_{13})}{Z_{33}}. \quad (2.4)$$

Пусть магнитные потоки  $\Phi_3$  и  $\Phi_{13}$ , сцепленные с контуром экрана и проводника 1 соответственно, созданные током в экране  $I_3$ . Тогда

$$\Phi_3 = L_3 I_3;$$

$$\Phi_{13} = M_{13} I_3.$$

Если экран представляет собой совершенный цилиндр, то внутри него магнитный поток отсутствует, и тогда  $\Phi_3 = \Phi_{13}$ ,  $L_3 = M_{13}$ .

В реальных условиях, когда экран выполнен из фольги, сплетен из проволоки и т.д., ток в экране создает некоторую продольную или радиальную составляющую магнитного потока, не сцепленную с первым контуром. Тогда разность  $L_l = L_3 - M_{13}$  не равна нулю и называется передаточной индуктивностью (обычно передаточная индуктивность выражается на единицу длины, и, таким образом, должна быть умножена на длину  $l$  цепи, которая должна быть много меньше длины волны).

Подобно погонному сопротивлению величина  $Z_l = (R_3 + j\omega L_l)/l$  называется *передаточным сопротивлением экрана*, или *сопротивлением связи*, через общий проводник (т.е. экран) и является характерным свойством кабеля (подробнее см. гл. 7), поэтому выражение для расчета наведенного в контуре  $l$  напряжения принимает вид:

$$U_1 = (R_3 + j\omega M_{12})I_2 k = U_1' k, \quad (2.5)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления,

$$k = \frac{Z_l l}{R_3 + R_3 + j\omega L_3}; \quad (2.6)$$

$U_1' = Z_{12} I_2 = (R_3 + j\omega M_{12}) I_2$  – напряжение помехи (продольная наведенная ЭДС), появляющееся на нагрузке цепи  $l$ , если экран отсутствует;  $R_3$  – активное сопротивление пути возврата тока экрана через землю, т.е. удвоенное сопротивление заземления одного из концов (при допущении, что  $R_3$  поровну разделено на обе стороны экрана).

*Коэффициент ослабления* представляет собой отношение напряжения помехи, измеренного при наличии заземленного экрана, к этому же напряжению в отсутствие экрана. Выраженный в децибелах он носит название *коэффициента эффективности экранирования* или *коэффициента экранирования*:

$$S = -20 \lg k.$$

Таким образом, для получения возможно большего эффекта снижения помехи необходимо, чтобы передаточное сопротивление было много меньше полного сопротивления экранирующей цепи (включая путь возврата через землю).

**Факторы, влияющие на коэффициент экранирования.** Причина, по которой индуктивность  $L_3$  должна оставаться большой, это необходимость иметь возможно более тесно связанные контуры  $l$  и  $3$  для достижения равенства потоков  $\Phi_{32} = \Phi_{12}$ .

Наиболее действенный ограничивающий фактор в деле снижения напряжения помехи обусловлен сопротивлением  $R_3$  экрана (при высоких частотах –  $Z_l$ ).

Заметим, что величина  $R_3$ , присутствующая одновременно в числителе и в знаменателе выражения для определения  $U_1$ , не является в нем определяющей. Увеличение  $R_3$  приводит к росту падения напряжения на контуре заземления и соответственно продольного напряжения помехи (связь через общее сопротивление) и к уменьшению (т.е. улучшению) коэффициента ослабления  $k$ .

Необходимо рассмотреть два возможных случая:

а) *чисто индуктивная связь*

$$Z_{12} = j\omega M_{12} = j\omega M_{32} = Z_{32}.$$

Наведенная ЭДС  $U_1' = j\omega M_{12} I_2$  делится пропорционально сопротивлениям  $R_3$  и  $R_3$ .

Отсюда следует, что чем больше величина сопротивления  $R_3$ , тем меньше падение напряжения на сопротивлении  $R_3$ , т.е. будет присутствовать напряжение помехи  $U_1$ ;

б) связь частично индуктивная, частично через общее сопротивление (см. рис. 2.9 и 2.10).

$$Z_{12} = R_3 + j\omega M_{12} = R_3 + j\omega M_{32} = Z_{32};$$

$$I_3 = -I_2 \frac{Z_{32}}{Z_{33}} = -I \frac{R_3 + j\omega M_{32}}{R_3 + R_3 + j\omega L_3}.$$

При сильном росте сопротивления  $R_3$  значение тока  $I_3$  будет стремиться к значению тока  $I_2$  и может превысить допустимую токовую нагрузку на экран. Поэтому в большинстве случаев стараются, чтобы сопротивление  $R_3$  было как можно меньшим.

В любом случае не столь важно присоединить экран к заземлителю, как присоединить его к заземленному корпусу оборудования (рис. 2.11) для того, чтобы сильно уменьшить площади  $A$  и  $B$  на рис. 2.10.

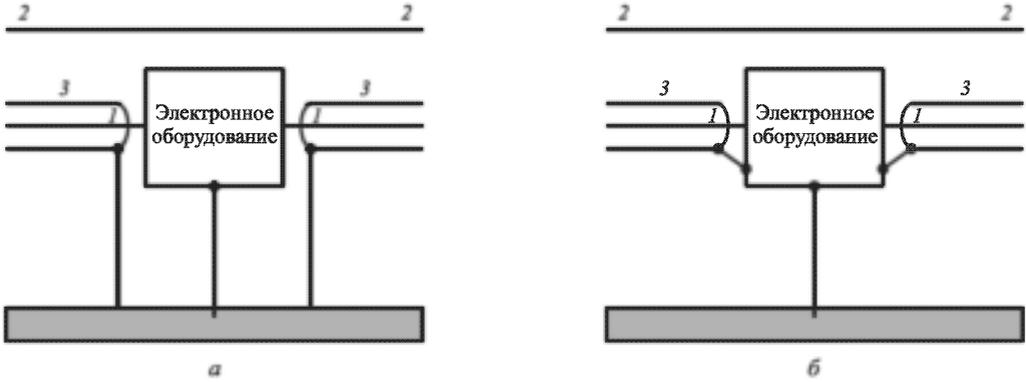


Рис. 2.11. Заземление экрана:

а – отдельным проводом; б – через корпус оборудования

Эти площади соответствуют той части магнитного потока, созданного контуром 2 (источником), которая сцеплена с контуром 1 (приемником) и не сцеплена с контуром 3 (экраном). Отношение этого потока к току  $I_3$  является так называемой собственной индуктивностью заземляющих выводов экрана  $L_3$  (величиной около 1 мкГн/м).

Так как она проявляется в разности  $L_3 - M_{13}$ , то должна быть добавлена к величине  $Z_1 I_1$ , откуда следует обобщенное выражение для коэффициента ослабления  $k$

$$k = \frac{Z_1 I_1 + j\omega L_3 I_3}{R_3 + R_3 + j\omega L_3}. \quad (2.7)$$

В идеальном случае экран кабеля должен быть продолжением корпуса оборудования, к которому он присоединен.

Приведем практический пример того, как низкокачественно выполненное заземление экрана может снизить эффективность экранирования.

Качественный экран обычно имеет передаточное сопротивление на частоте 1 МГц на уровне 10 мОм/м. Это означает, что для кабеля длиной 20 м значение  $Z_1 l$  будет составлять менее 0,2 Ом. Допустим, что кабель по обоим концам заземлен проводниками длиной 20 см. Вследствие этого на частоте 1 МГц на обоих концах кабеля получим

значение индуктивного сопротивления более 1 Ом (принимая  $L_G = 1$  мкГн/м). Таким образом, к передаточному сопротивлению кабеля, равному 0,2 Ом, необходимо добавить дополнительно около 2 Ом.

Зная, что индуктивное сопротивление  $j\omega L_3$  подобного кабеля на частоте 1 МГц составляет приблизительно 100 Ом (принимая  $L_3 = 1$  мкГн/м), получим ухудшение коэффициента ослабления с 0,2/100 до 2,2/100 или увеличение амплитуды помехи на порядок.

Наилучшее по помехозащищенности заземление экрана должно включать в себя его заземление по всей окружности. Рекомендуется использовать данное подключение экрана во всех случаях, когда кабели выходят из металлического корпуса оборудования.

Заземления экранов кабеля следует осуществлять, как показано на рис. 2.11.

**Экранирование как метод ослабления связи через общее сопротивление.** Следует отметить, что коэффициент ослабления  $k$  экрана кабеля может применяться вне зависимости от происхождения напряжения помехи  $U_1'$ , другими словами, напряжение  $U_1'$  может быть вызвано чисто магнитной связью.

ЭДС определяется как  $U_1' = j\omega M_{12} I_2$ , однако ее появление может быть вызвано повышением потенциала заземлителя (через гальваническую связь) –  $U_1' = R G_{12}$  или, в общем случае,  $U_1' = Z G_{12}$ .

Таким образом, несущественно, чем вызвано появление напряжения помехи  $U_1'$  – активной составляющей заземляющего проводника или индуктивной.

В дальнейшем увидим, что эффективность экранирования на низких частотах очень мала, и оно практически бесполезно для ослабления связи через общее сопротивление.

**Эффективность экранирования на низких частотах.** Коэффициент ослабления уменьшается с ростом частоты и при частоте 50/60 Гц может быть оценен по выражению

$$k = \frac{R_3}{R_3 + R_3 + j\omega L_3}. \quad (2.8)$$

Для снижения  $k$  необходимо либо уменьшить сопротивление  $R_3$  (т.е. увеличить поперечное сечение экрана, использовать медные или алюминиевые экраны (оболочки) вместо свинцовых, заземлять неиспользуемые проводники в кабеле), либо увеличить индуктивность цепи с обратным проводом через землю ( $L_3$ ) используя магнитные материалы (стальную бронь, ферромагнетики и т.д.).

Подобным образом индуктивное сопротивление  $j\omega L_3$  может быть увеличено в 7 раз (с 0,7 до 5,0 Ом/км). Однако при использовании ферромагнитных материалов следует помнить о возможности их насыщения, когда напряженность магнитного поля достигает 10 А/см (1000 А/м).

Обозначив через  $E$ ,  $I$ ,  $H$  продольную ЭДС, вызываемый ею ток и напряженность магнитного поля в экране радиусом  $r$ , получим

$$H = I/2\pi r;$$

$$I = E/Z,$$

где  $Z = j\omega L_3$  – полное сопротивление кабеля с землей в качестве обратного провода, отсюда

$$E = 2\pi H Z.$$

При  $H = 10$  А/м,  $r = 5$  см и  $Z = 5$  Ом/км получим, что в бронированном кабеле (без достижения насыщения) на частоте 50/60 Гц может быть наведено максимальное допустимое напряжение  $E = 300\text{--}400$  В/км.

Такие низкие значения очень часто превышаются при КЗ на высоковольтных электростанциях и подстанциях высокого напряжения.

**Эффективность экранирования на высоких частотах или при большой длине кабеля.** В этой ситуации сопротивление проводника  $\omega L_1$  начинает превалировать над сопротивлением нагрузки и становится сравнимым (одного порядка) с сопротивлением экрана  $\omega L_3$ .

Тогда выражение для коэффициента ослабления (2.6) может быть записано в виде

$$k \approx \frac{Z_t l}{Z_{s_1} + Z_{L_1}} \frac{L_1}{L_3} = \frac{Z_t l}{Z_{s_1} + Z_{L_1}}. \quad (2.9)$$

Для согласованной цепи

$$Z_{s_1} = Z_{L_1} = Z_{c_1},$$

где  $Z_{c_1}$  – волновое сопротивление кабеля, отсюда

$$k = \frac{Z_t l}{2Z_{c_1}}. \quad (2.10)$$

Выражение (2.10), хотя и очень простое и зависит только от характеристик кабеля, должно использоваться осторожно, так как в нем не учитывается волновой эффект, считается, что резонанс отсутствует и ток  $I_3$  синусоидальный.

Иногда приводят более общее выражение для коэффициента экранирования, учитывающее волновое сопротивление линии жила/экран  $Z_{c_1}$  и линии экран/земля  $Z_{c_3}$ .

$$k = \frac{Z_t l}{2\sqrt{Z_{c_1} Z_{c_3}}}.$$

При подстановке в данное выражение волновых сопротивлений, равных 50 Ом, получим классическое выражение для коэффициента эффективности экранирования

$$S = 40 - 20 \lg Z_t l.$$

В случае, если длина кабеля сравнима с половиной длины воздействующей волны напряжения, то при расчетах требуется учитывать эффект распространения, что в свою очередь требует применения численных методов.

Однако допустим, что оба проводника и экран включены на согласованное сопротивление, а затухание пренебрежимо мало, можно показать, что выражение (2.10) принимает следующий вид:

$$k = \frac{Z_t l}{2Z_{c_1}} F(\omega l). \quad (2.11)$$

Коэффициент  $F(\omega l)$  при низких частотах равен единице, а огибающая зависимость от частоты имеет вид гиперболы  $1/f$  при значениях частоты выше  $v_1 v_3 / (v_1 + v_3) l$  или  $v_1 v_3 / (v_3 - v_1) l$  (где  $v_1$  и  $v_3$  – скорость распространения электромагнитной волны по цепям 1 и 3) в зависимости от того, течет ли ток помехи от нагрузки или к нагрузке соответственно.

Максимальные значения коэффициента  $F(\omega l)$  могут изменяться при явлении возможного резонанса в цепи, если проводники или экран не согласованы на своих концах.

**Экранирование цепи источника помехи.** Для снижения помехи вместо цепи приемника помехи можно экранировать цепь ее источника (рис. 2.12).

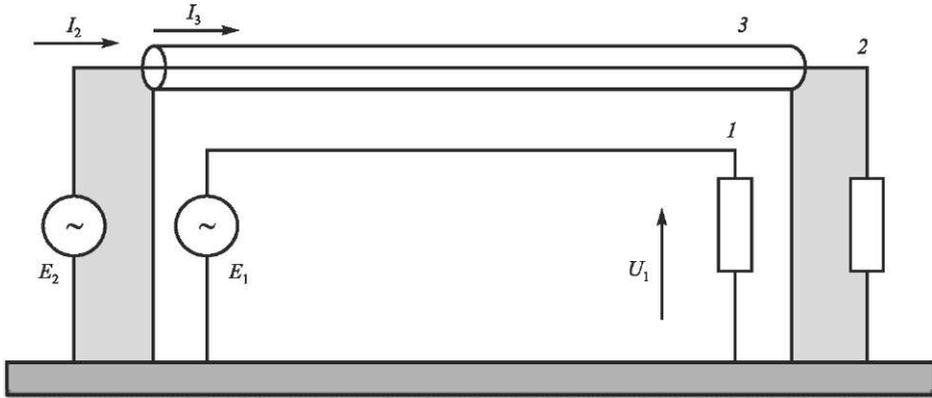


Рис. 2.12. Экранирующее действие трубчатого проводника, окружающего источник помехи

Суть метода состоит в уменьшении магнитного потока источника. Кроме того, при таком исполнении в случае КЗ на землю в силовой сети сопротивление обратного провода будет меньше, чем в случае протекания тока КЗ через землю или через сеть заземления, а также исключается протекание опасных токов (вызванных КЗ) через экраны защищаемых кабелей. Такой подход ослабляет связь через общее сопротивление (принцип магнитной развязки).

Выражение для коэффициента ослабления может быть снова получено из общего выражения (2.2), с учетом, что теперь  $Z_{12} = Z_{13}$ , отсюда

$$U_1 = Z_{12} I_2 \frac{Z_{33} - Z_{32}}{Z_{33}}. \quad (2.12)$$

По причинам, указанным ранее, имеем  $L_3 = M_3$  и  $L_t = L_3 - M_{23}$ , вследствие чего, выражение для  $k$  принимает тот же вид, что и при экранировании цепи приемника.

Коэффициент ослабления силового кабеля иногда дается в виде эквивалентного выражения, т.е. в виде отношения тока в земле  $I_2 + I_3$  к току КЗ  $I_2$ .

В действительности, используя выражение (2.1), можно показать, что отношение  $(Z_{33} - Z_{32})/Z_{33}$  эквивалентно выражению  $(I_2 + I_3)/I_2$ .

На частоте 50/60 Гц коэффициент  $k$  может достигать 0,1, если экран обладает малым активным сопротивлением и представляет магнитные материалы (стальные листы), не насыщенные магнитным потоком (насыщение достигается при превышении током значения 2000 А).

При экранировании одновременно источника и приемника помех достигается большее ослабление помех, чем при экранировании одной из цепей, однако коэффициент ослабления меньше, чем произведение отдельных коэффициентов

$$k = \frac{Z_{t_1} Z_{t_2} I^2}{Z_1 Z_2 - Z_M^2},$$

где  $Z_{t_1}$  и  $Z_{t_2}$  – передаточные сопротивления экрана цепи источника помех и экрана цепи приемника помех соответственно;  $Z_1 \approx Z_{11}$  и  $Z_2 \approx Z_{22}$  – сопротивления этих же цепей в сумме с сопротивлением пути возврата через землю;  $Z_M$  – полное взаимное сопротивление между указанными цепями с учетом цепи возврата через землю.

Во многих случаях заметный эффект ослабления может быть достигнут без применения экранирования, посредством прокладки кабелей в непосредственной близости от металлоконструкций с многократным заземлением, например, кабельных каналов, лотков, стеллажей, проводников заземления, экранов других кабелей и т.п.

**Совместное действие симметрирования и экранирования.** Основной эффект от экранирования достигается, в основном, на высоких частотах ( $>10$  кГц) и его действие направлено на напряжения, возникающие между проводниками и землей (сифазное напряжение), тогда как применение симметрирования более эффективно на низких частотах ( $<100$  кГц) и воздействует на напряжения между проводниками (противофазные напряжения). Применение обоих методов дает наилучшие результаты. Напряжения общего вида частично преобразуются в противофазные напряжения из-за некоторой несимметрии кабелей и различий в сопротивлениях нагрузки, что делает весьма сложной задачу их предсказания. В частности, проведенные исследования показали, что передаточное сопротивление для противофазной помехи не всегда соответствует передаточному сопротивлению для сифазной помехи.

**Передаточное сопротивление и проводимость экрана кабеля.** При изучении вопросов ЭМС кабель рассматривают как набор из двух взаимосвязанных контуров жила-экран и экран-земля (см. гл. 4).

На рис. 2.13 представлен коаксиальный кабель (т.е. экранированный проводник), расположенный над проводящей плоскостью нулевого потенциала.

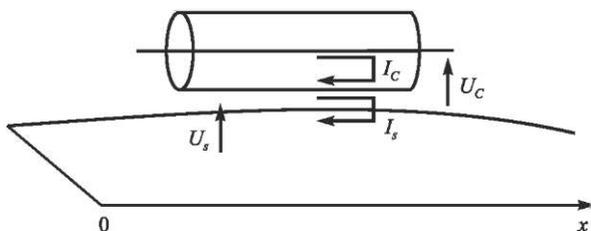


Рис. 2.13. Коаксиальный кабель, расположенный над плоскостью нулевого потенциала

Первый контур состоит из внутреннего проводника (жилы) и внешнего проводника (экрана) кабеля, в то время как второй включает в себя внешний проводник (экран) кабеля и плоскость земли.

Обозначим токи, протекающие в контурах жила-экран и экран-земля через  $I_C$  и  $I_S$ , а напряжения между жилой и экраном и между экраном и землей через  $U_C$  и  $U_S$ . Для данной системы запишем систему линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} -\frac{dU_C}{dx} = Z_C I_C - Z_I I_S; \\ -\frac{dU_S}{dx} = -Z_I I_C + Z_S I_S; \\ -\frac{dI_C}{dx} = Y_C U_C + Y_I U_S; \\ -\frac{dI_S}{dx} = Y_I U_C + Y_S U_S, \end{cases}$$

где  $Z_C, Z_s, Y_C$  и  $Y_s$  – удельные сопротивления и проводимости обеих линий;  $Z_t$  и  $Y_t$  – сопротивление и проводимость связи через общий проводник (экран).

Сопротивление  $Z_s$  отличается от сопротивления  $Z_t$ , так как в его состав входит сопротивление земли. Более того, вследствие поверхностного эффекта при высоких частотах, происходит частичная естественная развязка контуров и полностью изменяется зависимость обоих сопротивлений от частоты.

Получим выражения для сопротивления и проводимости связи:

$$\begin{cases} Z_t = \frac{1}{I_s} \left( \frac{dU_C}{dx} \right)_{I_C=0} ; \\ Y_t = -\frac{1}{U_s} \left( \frac{dI_C}{dx} \right)_{U_C=0} . \end{cases}$$

Первый параметр  $Z_t dx$  представляет собой отношение разности напряжений между проводником и экраном на концах бесконечно малого элемента коаксиального кабеля  $dx$  к току, протекающему в экране; при этом в жиле ток отсутствует (измерения при разомкнутой цепи) (рис. 2.14а).

Эквивалентное выражение для элемента конечной длины ( $\Delta x$  вместо  $dx$ ), обычно используемое для практических измерений (рис. 2.14б).

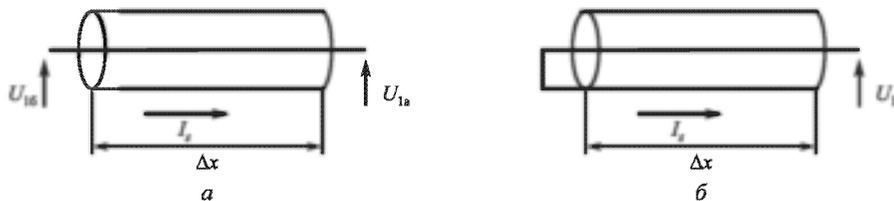


Рис. 2.14. Передаточное сопротивление экрана:

$$a - Z_t = (U_{1a} - U_{1b})/I_s \Delta x; \quad б - Z_t = U_1/I_s \Delta x$$

Обычно для частот, меньших нескольких мегагерц, значение  $\Delta x$  может быть выбрано равным 1 м.

Сопротивление связи представляет собой сумму активной и реактивной составляющих. Активная составляющая – это не что иное, как активное сопротивление экрана, по крайней мере на низких частотах. Реактивная составляющая определяется изменением магнитного потока, созданного током  $I_s$  между внутренним и внешним проводником.

Для совершенно однородной трубки этот поток равен нулю, если же в экране имеются отверстия или разрывы или путь протекания тока не параллелен оси кабеля (например, для спирально намотанных лент или проволоки), поток не равен нулю.

При сравнении полученных выражений с формулами, приведенными ранее, видно, что они эквивалентны друг другу ( $I_s = I_3, R_t = R_3$ ), причем их вывод, приведенный здесь, является более строгим.

Таким образом, выражение  $Z_t = R_t + j\omega L_t$  представляет собой упрощенное выражение для передаточного сопротивления экрана. Оно напрямую (по крайней мере, для коротких по сравнению с длиной волны кабелей) характеризует уровень напряжения синфазной помехи общего вида, наведенного в кабеле (между жилами и экраном) при протекании по экрану тока помехи.

По аналогии с  $Z_i$ ,  $Y_i$  является передаточной проводимостью, которая определяется напряжением между экраном и землей. В отличие от  $Z_i$ , которое определяется связью через общее сопротивление и индуктивной связью,  $Y_i$  отражает влияние емкостных токов, проникающих в кабель через разрывы в экране под влиянием приложенного к нему напряжения (или электрического поля). Передаточная проводимость представляет меньший практический интерес, чем передаточное сопротивление, и будет рассмотрена далее.

**Значимость передаточного сопротивления.** Передаточная функция является основным понятием, необходимым для решения любого типа вопросов, связанных с механизмами передачи помех. Среди всех возможных типов передаточных функций, одним из важнейших является передаточное сопротивление экрана кабеля, так как:

- оно является характерным внутренним параметром каждого кабеля, хорошо изучено и может быть измерено и указано в спецификации;
- кабельная система любой установки играет важную роль в реализации механизмов передачи помех;
- знание передаточного сопротивления кабеля позволяет (в некоторой степени) разбить общую проблему взаимосвязи на две части, которые, как правило, раздельно решаются легче.

Первая часть, иногда называемая внешней включает в себя определение значения тока, протекающего по кабельному экрану при воздействии на него электромагнитного поля.

Вторая часть, так называемая внутренняя, состоит в определении напряжения помехи общего вида на концах экранированного кабеля. Она весьма проста, если длина цепи много меньше наименьшего значения длины волны. В этом случае  $U = Z_i I$ . Если это условие не выполняется, задача усложняется. В этой ситуации необходимо найти зависимость вида  $U = f(Z_i, l, I \dots)$ , либо обратиться к численным методам.

Примеры помех, передаваемых магнитной связью:

- помехи при коммутациях на подстанциях с ОРУ;
- помехи, создаваемые магнитными полями, установками промышленной частоты;
- помехи при близких ударах молнии, т.е. ударах в непосредственной близости от цепей автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами;
- помехи, вызванные разрядами статического электричества, вблизи оборудования.

## 2.5. Емкостная связь

В отличие от индуктивной связи, емкостная связь проявляется под действием электрического поля источника помех, а не протекающих в нем токов.

Емкости связи весьма малы, поэтому при больших расстояниях между источником и приемником помех емкостная связь ощутима лишь при достаточно большом сопротивлении цепи приемника (нагрузочное сопротивление на концах кабеля) либо при очень близком расположении цепей приемника и источника.

Емкость между проводниками обратно пропорциональна расстоянию. К примеру, два проводника одного кабеля обладают взаимной емкостью порядка 100 пФ/м. Увеличение расстояния между ними всего лишь на 5 см приводит к уменьшению взаимной емкости в 70 раз, в то время как дальнейшее увеличение расстояния до 50 см вызывает уменьшение емкости менее чем в 2 раза. Данный пример показывает важность рассмотрения емкостной взаимосвязи при близком расположении цепей.

Единственным способом ослабления емкостной связи, если невозможна раздельная прокладка проводников или уменьшение сопротивления (стратегия разомкнутой цепи), остается экранирование защищаемого проводника и соединение экрана с заземлением в одной точке (стратегия замкнутой цепи) (рис. 2.15).

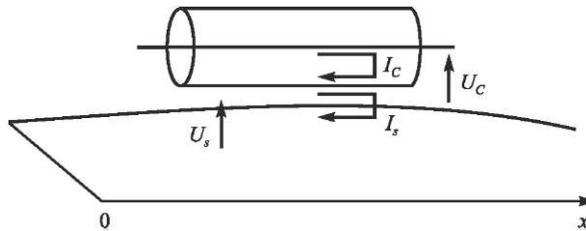


Рис. 2.15. Экранированный проводник:

*a* – емкостная связь

$$U_1 = E_2 \frac{C_2}{C_2 + C_1};$$

*b* – экранирование при емкостной связи  $U_1 = j\omega RC_2 E_2$ , если

$$\begin{cases} C_3 \gg C_1; \\ \omega \ll \frac{1}{R(C_1 + C_2)}; \\ \omega \ll \frac{3 \cdot 10^8}{l} \end{cases}$$

Экран для ослабления емкостной связи не настолько критичен к качеству исполнения, как экран для снижения индуктивной связи. Особую важность приобретает передаточная проводимость  $Y_t$ , передаточное же сопротивление теряет свое значение.

Проводимость зависит от структуры отверстий в экране и от удельной взаимной емкости между жилой и экраном.

Кабели в оплетке с большим коэффициентом покрытия, кабели в оболочке из металлической фольги или лент (даже в случае их спиральной намотки) обычно обладают очень низкой передаточной проводимостью, которой обычно можно пренебречь, если экран присоединен к земле.

Это верно при низких частотах (50/60 Гц) и объясняет, почему, например, такие некачественные проводники, как стены домов, достаточно эффективно снижают электрические поля внутри дома, вызванные внешними источниками электрических полей.

Однако снижение помех, обусловленных электрическим полем при помощи экрана, эффективно только при низких частотах, когда продольными сопротивлениями можно пренебречь по сравнению с поперечными емкостными.

При высоких частотах возникает необходимость заземления экрана более чем в одной точке, в частности на обоих концах кабеля.

Примеры помех, передаваемых емкостной связью:

- помехи, создаваемые низкочастотным электрическим полем, силовых установок высокого напряжения;
- помехи, обусловленные быстрыми переходными процессами, вызванными коммутациями в сети низкого напряжения;
- перекрестные помехи в сигнальных кабелях;

- синфазные помехи за счет связи между первичной и вторичной обмотками разделительного трансформатора, оптронов, трансформаторов тока или напряжения на ПС.

## 2.6. Связь излучением

Предыдущие рассмотрения основываются на предположении, что размеры цепи (включая источник и приемник помех) много меньше длины волны  $\lambda = c/f$ , где  $f$  – наибольшая частота спектрального состава помехи. В этом случае имеем дело с полями ближней зоны. В зоне, где выполняется это условие, отношение напряженностей электрического и магнитного полей  $Z_w = E/H$ , называемое *волновым сопротивлением*, может принимать значения, зависящие от вида источника излучения и расстояния между ним и приемником излучения.

Если  $Z_w < 377$  Ом, то преобладает магнитное поле, источник носит название *низкоомного источника больших токов* (и низких напряжений), а в качестве модели используют модель индуктивной связи.

При  $Z_w > 377$  Ом преобладает электрическое поле, источник (высокоомный) характеризуется большими напряжениями и малыми токами, а в качестве модели связи используют емкостную модель.

При увеличении расстояния от источника отношение  $E/H$  стремится к значению 377 Ом, называемому *волновым сопротивлением вакуума*. В этих условиях отсутствует преобладание какой-либо составляющей поля, которое представляет собой электромагнитное поле излучения.

Расстояние, при котором достигается данное условие, определяет собой границу между дальней и ближней зонами электромагнитного поля.

Если размеры источника много меньше длины волны, то граница указанных зон располагается на расстоянии  $R = \lambda/2\pi$  от него (порядка одной шестой части длины волны).

Однако, если максимальный размер  $D$  источника больше по величине половины длины волны, то граница зон определяется выражением  $R \approx D^2/2\lambda$ .

На рис. 2.16 приведены зависимость  $Z_w$  от расстояния до источника и скорость уменьшения поперечных составляющих поля (при расчетах радиальной составляющей электромагнитного поля пренебрегли).

Если помеха имеет импульсную природу, то наибольшая по частоте и все еще заметная по величине составляющая его спектра определяется по выражению  $f = 1/\pi\tau_r$ , где  $\tau_r$  – длительность фронта импульса.

Основными источниками излучаемого электромагнитного поля являются молния, коммутации на элегазовых ПС, радиопередатчики и переговорные устройства. Первые два являются источниками импульсных полей, два последних – источниками фиксированной частоты излучения.

Например, радиопередатчик, работающий в диапазоне средних волн ( $f = 1$  МГц), имеет длину волны  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/10^6 = 300$  м, откуда следует, что связь излучением имеет место на расстояниях, больших  $300/2\pi = 50$  м.

Для разрядов молнии характерны аналогичные значения расстояний, так как  $\tau_r = 0,5$  мкс, а  $f = 0,6$  МГц.

С другой стороны, типичная длительность фронта волны электромагнитного поля, создаваемого при коммутациях на элегазовых ПС, составляет  $\tau_r = 5$  нс. Этому значению соответствует длина волны  $\lambda = 4,5$  м, поэтому связь излучением может происходить на расстояниях меньше 1 метра.

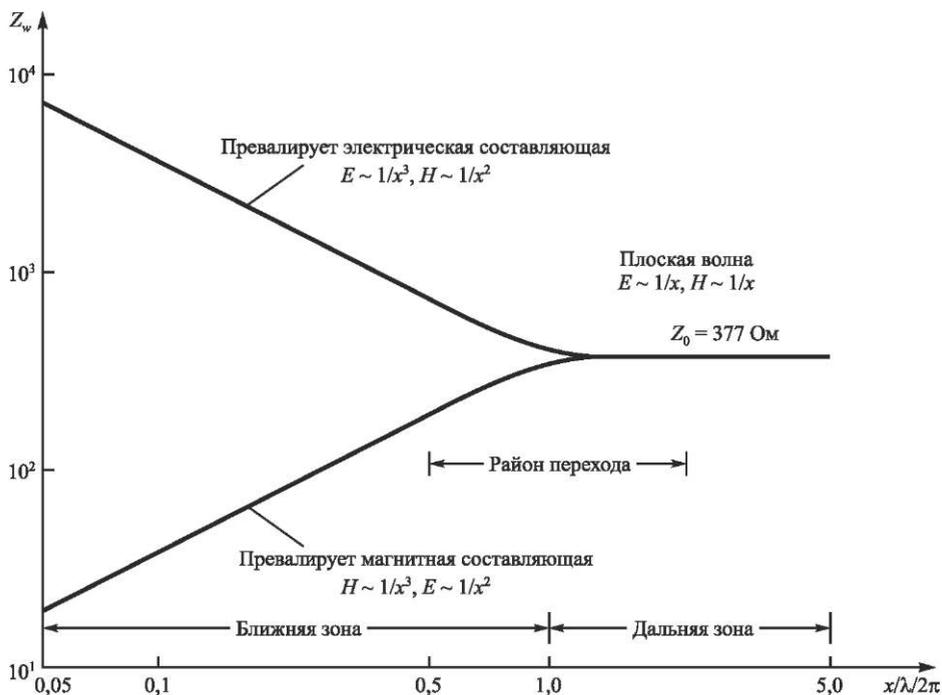


Рис. 2.16. Волновое сопротивление  $Z_w$  в функции расстояния  $x/(\lambda/2\pi)$  от источника

Итак, помехи определяются ближней зоной излучения при расстоянии приемника от их источника:

- до 5000 м – при частоте  $f = 0,01$  МГц;
- до 500 м – при частоте  $f = 0,1$  МГц;
- до 50 м – при частоте  $f = 1$  МГц;
- до 5 м – при частоте  $f = 10$  МГц;
- до 0,5 м – при частоте  $f = 100$  МГц.

Во всех случаях, где выполняются условия дальней зоны, изучение явления становится достаточно сложным (в частности, если размеры цепи больше длины волны), так как теория цепей не может быть больше применена. В этих случаях следует обращаться к обобщенным моделям, основанным на теории Максвелла. Подробно применительно к использованию методов теории длинных линий эта проблема изложена в гл. 7, а конкретные решения задач, основанные на выкладках гл. 7, могут быть реализованы с помощью компьютерного моделирования.

При этом основные принципы, описанные ранее и все методы снижения помех, основанные на них, также эффективны для снижения ВЧ-помех, вызванных полевым механизмом связи.

Более того, введение в рассмотрение условия распространения помех также означает их затухание.

При анализе работы электростанций и подстанций возмущения, вызванные излучением, оказываются меньше по величине, чем возмущения, вызванные индуктивной связью. Для пояснения последнего утверждения обратимся к одному из аналитических выражений теории длинных линий.

Можно показать, что среднее синфазное напряжение, измеренное на согласованной нагрузке на конце длинного экранированного кабеля, заземленного на обоих концах и подверженного воздействию электромагнитного поля, может быть определено при помощи простого выражения.

$$U_L = \frac{2E_x h}{Z_{c3}} L_t \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.13)$$

где  $E_x$  – напряженность электрического поля на высоте кабеля над поверхностью земли;  $Z_{c3}$  – волновое сопротивление контура экран–земля;  $L_t$  – его передаточная индуктивность (при этом делается допущение, что индуктивное сопротивление много больше активного);  $c$  – скорость света;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками и экраном;  $h$  – высота кабеля над поверхностью земли.

При сравнении выражений (2.13) и (2.10) оказывается, что средний уровень помех в действительности не зависит от длины линии, в то время как анализ выражений при выводе которых эффект распространения не учитывался, указывают на прямо пропорциональную зависимость от длины кабеля. Это приводит к завышению действительного уровня помех. С другой стороны, выражение (2.13) не правомерно при явлении резонанса, т.е. когда длина волны кратна  $\lambda/2$ .

Хорошо известно, что явления резонанса, если не принять никаких мер по их демпфированию, могут ощутимо снизить эффективность экранирования кабелей. Парадокс заключается в том, что чем лучше экран (т.е. чем меньше его проводимость), тем выше риск недостаточного демпфирования резонансных явлений. Это является главной причиной того, что кабели с двумя экранами, соединенными только на одном конце, обладают меньшим коэффициентом экранирования, чем это следовало бы ожидать по результатам измерений передаточного сопротивления.

Другим допущением, принятом при выводе выражения (2.13), является согласованность кабеля на обоих концах.

Это допущение обычно выполняется для коаксиальных кабелей, но не для симметричных цепей, в которых входное синфазное сопротивление для конечного оборудования обычно больше волнового сопротивления кабелей. Однако, вследствие значительного снижения синфазного сопротивления с ростом частоты, можно допустить, что данное выражение дает хорошую оценку уровней помех, встречающихся на практике.

Примеры помех, передаваемых связью излучением:

- помехи, вызванные электрическими переходными процессами, при коммутациях на элегазовых подстанциях;
- помехи при удаленных ударах молнии (несколько сотен метров от приемника);
- полевые помехи высокой частоты, создаваемые радиопередатчиками.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Назовите характерные положения теории антенн, длинных линий и цепей. В чем состоит теория цепей?
2. Изложите классификацию способов передачи помех.
3. В чем состоит механизм связи через полное сопротивление и способы его ослабления?
4. Охарактеризуйте механизм индуктивной связи и способы его ослабления.
5. Назовите примеры индуктивной связи.
6. Как ослабить индуктивную связь с помощью короткозамкнутого контура?
7. Каким образом осуществляется экранирование приемника высокочастотных помех?

8. Поясните смысл передаточного сопротивления экрана, или сопротивления связи.
9. Как низкосортное выполнение заземления экрана может снизить эффективность экранирования?
10. Зависит ли эффективность экранирования от частоты помехи?
11. Поясните смысл выражений для сопротивления и проводимости связи кабельных линий.
12. Назовите области применения симметрирования и экранирования в цепях с индуктивной связью.
13. Перечислите примеры помех, передаваемых емкостной связью и способы их ослабления.
14. Каким образом осуществляется связь излучением?
15. В чем состоят отличительные особенности ближней и дальней зон излучения?
16. Как меняется волновое сопротивление в ближней зоне в зависимости от расстояния до источника излучения?
17. Почему не может быть применена теория цепей для дальней зоны излучения?
18. Назовите примеры помех, передаваемых через излучение.

## ГЛАВА 3

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

### 3.1. Классификация электромагнитной обстановки и степени жесткости испытаний на помехоустойчивость

**Общие положения.** Чтобы исключить или уменьшить опасность воздействия электромагнитных возмущений на устройства автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами, проводят испытания на устойчивость к воздействию помех различного вида и устанавливают уровни помехоустойчивости этих устройств.

При проектировании автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами выбор устройств осуществляют с учетом электромагнитной обстановки в местах их установки.

Критерии качества функционирования применяют при испытаниях технических средств (ТС) на помехоустойчивость (табл. 3.1).

Таблица 3.1

#### Критерии качества функционирования устройств при испытаниях

Критерии качества функционирования ТС при испытаниях	Качество функционирования ТС при испытаниях
<i>A</i>	Нормальное функционирование с параметрами в соответствии с техническими условиями
<i>B</i>	Кратковременное нарушение функционирования или ухудшение параметров с последующим восстановлением нормального функционирования без вмешательства оператора
<i>C</i>	Нарушение функционирования или ухудшение параметров, требующее для восстановления нормального функционирования вмешательства оператора
<i>D</i>	Нарушение функционирования или ухудшение параметров, требующее ремонта из-за выхода из строя оборудования или компонентов

Уровень электромагнитных помех в условиях эксплуатации и уровень восприимчивости ТС в общем случае являются случайными величинами.

Вероятность амплитуд помех подчиняется некоторому закону. При большом числе влияющих факторов закон распределения, как правило, является нормальным.

Восприимчивость ТС к помехам можно также характеризовать некоторыми вероятностными кривыми. В идеальном случае интегральные кривые электромагнитных помех и восприимчивости к ним не должны иметь общего заметного диапазона значений напряжений, где уровень восприимчивости ниже уровня помех. Такая ситуация означает абсолютную ЭМС рассматриваемого устройства. По мере сближения кривых вероятности амплитуд помех и помеховосприимчивости уровень ЭМС становится все хуже.

В соответствии со сказанным устанавливаются нормированные уровни испытательных величин, которые, с одной стороны, должны быть не менее расчетного уровня допустимых помех и, с другой стороны, – меньше уровня восприимчивости конкретного устройства.

Это условие необходимо соблюдать при согласовании выбора уровня испытательных воздействий (степени жесткости испытаний) с уровнями параметров электромагнитной обстановки при эксплуатации ТС.

**Классификация электромагнитной обстановки окружающей среды.** Электромагнитная обстановка окружающей среды представляет собой многовариантную систему с широким разбросом параметров, количества, вида и интенсивности проявляющихся в данном месте электромагнитных воздействий. Экономически нецелесообразно выполнять любое устройство или автоматическую и автоматизированную систему технологического управления электротехническими объектами абсолютно стойкими к самым жестким электромагнитным воздействиям. Требуется классификация электромагнитных условий окружающей среды по видам и уровням воздействия, в соответствии с которой можно сформулировать требования, предъявляемые к различным устройствам в отношении электромагнитной совместимости.

Приведем характеристики классов окружающей среды.

Электромагнитную обстановку принято характеризовать как легкую (класс 1), средней жесткости (класс 2), жесткую (класс 3) и крайне жесткую (класс 4). Электромагнитной обстановке под таким же номером соответствуют степень жесткости испытаний технических средств на электромагнитную совместимость и группа их исполнения.

*Класс 1. Легкая электромагнитная обстановка:*

- осуществлены оптимизированные и скоординированные мероприятия по подавлению помех, защите от перенапряжений во всех цепях;
- электропитание отдельных элементов устройства резервировано, силовые и сигнальные цепи выполнены отдельно;
- выполнение заземлений, прокладка кабелей, экранирование произведено в соответствии с требованиями электромагнитной совместимости;
- климатические условия контролируются и приняты специальные меры по предотвращению разрядов статического электричества.

*Класс 2. Электромагнитная обстановка средней жесткости:*

- цепи питания и управления частично оборудованы помехозащитными устройствами и устройствами для защиты от перенапряжений;
- отсутствуют силовые выключатели, устройства для отключения конденсаторов, катушек индуктивностей;
- электропитание устройств осуществляется от сетевых стабилизаторов;
- имеется тщательно выполненное заземляющее устройство;

- токовые контуры разделены гальванически;
- предусмотрено регулирование влажности воздуха, материалы, способные электризоваться трением, отсутствуют;
- применение радиопереговорных устройств, передатчиков, запрещено.

Эта обстановка типична для диспетчерских помещений промышленных предприятий, электростанций и подстанций.

*Класс 3. Жесткая электромагнитная обстановка.*

- защита от перенапряжений в силовых цепях и цепях управления не предусмотрена;
- повторного зажигания дуги в коммутационных аппаратах не происходит;
- имеется контур заземления;
- провода электропитания, управления и коммутационных цепей недостаточно разделены;
- кабели линий передачи данных, сигнализации, управления разделены;
- относительная влажность воздуха поддерживается в определенных пределах, нет материалов, электризуемых трением;
- использование переносных радиопереговорных устройств ограничено (установлены ограничения приближения к приборам на определенное расстояние).

Эта обстановка характерна для промышленных цехов, электростанций, релейных помещений подстанций.

*Класс 4. Крайне жесткая обстановка.*

- защита в цепях управления и силовых контурах от перенапряжений отсутствует;
- имеются коммутационные устройства, в аппаратах которых возможно повторное зажигание дуги;
- существует неопределенность в выполнении заземляющего устройства;
- нет пространственного разделения проводов электропитания, управления и коммутационных цепей;
- управление и сигнализация осуществляются по общим кабелям;
- допустимы любая влажность воздуха и наличие электризуемых трением материалов;
- возможно неограниченное использование переносных переговорных устройств;
- в непосредственной близости могут находиться мощные радиопередатчики;
- вблизи могут находиться дуговые технологические устройства (электроды, сварочные машины и т.п.).

Типичными для этого класса являются территории вблизи промышленных предприятий, электростанций, открытых распределительных устройств среднего и высоковольтных напряжений, где не предусматриваются специальные меры по обеспечению электромагнитной совместимости.

**Воспроизведение электромагнитных помех при испытаниях.** Устройства автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами проходят испытания на устойчивость к воздействиям электромагнитных помех в соответствии с базовым нормативно-техническим документом в области электромагнитной совместимости: ГОСТ 29280–92 «Испытания на помехоустойчивость. Общие положения». В этом документе рассматриваются практически все виды испытаний. По отдельным видам испытаний (в более подробном изложении) выпущены серии ГОСТ Р 51317.4.

В настоящее время в России вводятся в действие новые отечественные стандарты, включающие также методы испытаний (более 50 стандартов), гармонизированные

с международными стандартами и европейскими нормами, регламентирующими объемом современных требований к техническим средствам по обеспечению ЭМС.

Базовые публикации по нормам испытаний на ЭМС приведены в приложениях 1 и 2.

Перечень основных видов электромагнитных помех со стандартизованными параметрами, применяемых при испытаниях ТС на помехоустойчивость, установленных международными стандартами ЭМС серии МЭК 61000-4, включает в настоящее время 17 электромагнитных воздействий (табл. 3.2). Анализ данных табл. 3.2 показывает, что номенклатура стандартизованных электромагнитных воздействий, устанавливаемых стандартами МЭК серии 61000-4, в целом, соответствует номенклатуре видов электромагнитных помех на электрических станциях и подстанциях.

Таблица 3.2

**Перечень основных видов электромагнитных помех и стандартов по испытаниям на помехоустойчивость**

Категория электромагнитных помех	Обозначение государственного стандарта России	Наименование электромагнитной помехи, обозначение стандарта МЭК
Низкочастотные кондуктивные электромагнитные помехи	ГОСТ Р 51317.4.14–2000	Колебания напряжения электропитания, МЭК 610004-14–2000
	ГОСТ Р 51317.4.11–99	Динамические изменения напряжения электропитания, МЭК 61000-4-11–94
	ГОСТ Р 51317.4.28–2000	Изменение частоты питающего напряжения, МЭК 61000-4-28–2000
	В разработке	Несимметрия питающего напряжения, МЭК 61000-4-27
	ГОСТ Р 51317.4.16–2000	Кондуктивные помехи, представляющие собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, МЭК 61000-4-16–98
	В разработке	Динамические изменения напряжения электропитания постоянного тока, МЭК 61000-4-29–2000
	ГОСТ Р 51317.4.17–2000	Пульсации напряжения электропитания постоянного тока, МЭК 61000-4-17–99
	В разработке	Низкочастотные гармоники и интергармоники, включая сигналы, передаваемые по силовым линиям, МЭК 61000-4-13
Низкочастотные излучаемые электромагнитные помехи	ГОСТ Р 50648–94	Магнитное поле промышленной частоты, МЭК 61000-4-8–93
Высокочастотные кондуктивные электромагнитные помехи	ГОСТ Р 51317.4.4–99	Наносекундные импульсные помехи, МЭК 61000-44–95
	ГОСТ Р 51317.4.5–99	Микросекундные импульсные помехи большой энергии, МЭК 6 1000-4-5–95

Категория электромагнитных помех	Обозначение государственного стандарта России	Наименование электромагнитной помехи, обозначение стандарта МЭК
Высокочастотные кондуктивные электромагнитные помехи	ГОСТ Р 51317.4.6–99	Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями, МЭК 61000-4-6–96
	ГОСТ Р 51317.4.12–99	Колебательные затухающие помехи, МЭК 61000-4-12–96
Высокочастотные излучаемые электромагнитные помехи	ГОСТ Р 51317.4.3–99	Радиочастотное электромагнитное поле, МЭК 61000-4-3–95
	ГОСТ Р 50649–94	Импульсное магнитное поле, МЭК 61000-4-9–93
	ГОСТ Р 50652–94	Затухающее колебательное магнитное поле, МЭК 61000-4-10–93
Разряды статического электричества	ГОСТ Р 51317.4.2–99	Разряды статического электричества, МЭК 61000-4-2–95

В табл. 3.3. приведены рекомендации по выбору портов ТС, подлежащих воздействию помех при проведении испытаний на помехоустойчивость.

Таблица 3.3

**Рекомендации по выбору портов ТС, подлежащих воздействию помех при проведении испытаний на помехоустойчивость**

Наименование помехи, вида испытаний	Рекомендации по выбору портов ТС, подлежащих воздействию помех				
	Порты электропитания переменного тока	Порты электропитания постоянного тока	Порт корпуса	Порт ввода-вывода сигналов	Порты заземления
Разряды статического электричества	НП	Н	П	Н	Н
Радиочастотное электромагнитное поле	Н	Н	П	Н	Н
Наносекундные импульсные помехи	П	П	НП	М	М
Микросекундные импульсные помехи большой энергии	П	М	НП	М	М
Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	П	П	НП	П	П
Магнитное поле промышленной частоты	НП	НП	М	НП	НП
Импульсное магнитное поле	НП	НП	М	НП	НП
Затухающее колебательное магнитное поле	НП	НП	М	НП	НП

Наименование помехи, вида испытаний	Рекомендации по выбору портов ТС, подлежащих воздействию помех				
	Порты электропитания переменного тока	Порты электропитания постоянного тока	Порт корпуса	Порт ввода-вывода сигналов	Порты заземления
Динамические изменения напряжения электропитания	П	НП	НП	НП	НП
Колебательные затухающие помехи, в том числе: одиночные колебательные затухающие помехи, повторяющиеся колебательные затухающие помехи	М	Н	НП	М	Н
	М	М	НП	М	М
Низкочастотные гармоники и ингергармоники, включая сигналы, передаваемые по силовым линиям	Н	НП	НП	Н	НП
Колебания напряжения электропитания	Н	НП	НП	НП	НП
Кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц	Н	Н	НП	Н	НП
Пульсации напряжения электропитания постоянного тока	НП	М	НП	НП	НП
Несимметрия напряжений электропитания	М	НП	НП	НП	НП
Изменения частоты питающего напряжения	Н	НП	НП	НП	НП
Динамические изменения напряжения электропитания постоянного тока	НП	М	НП	НП	НП

Примечание. П – подлежит воздействию, за исключением специальных случаев; Н – не подлежит воздействию, за исключением специальных случаев; М – подлежит воздействию при определенных обстоятельствах; НП – не подлежит воздействию.

### 3.2. Нормированные и действительные уровни помех на объектах энергетики

В условиях эксплуатации электротехническое оборудование подвергается электромагнитным воздействиям различного происхождения (см. гл. 1).

Далее приводятся результаты измерений электромагнитной обстановки в местах планируемого размещения микропроцессорных устройств релейной защиты МПУ РЗА фирмы Siemens на энергетических объектах, проанализированы степени их устойчивости к нормированным электромагнитным воздействиям по характеристикам, приведенным в сертификате фирмы, определяются коэффициенты запаса по устойчивости

к электромагнитным воздействиям при эксплуатации устройств в измеренной окружающей электромагнитной обстановке, даны рекомендации о необходимости проведения лабораторных испытаний или испытаний по месту эксплуатации для подтверждения требований обеспечения электромагнитной совместимости.

Результаты измерений параметров электромагнитной обстановки в местах планируемого по проекту размещения МПУ РЗА фирмы Siemens приведены в табл. 3.4.

По проекту внедрения МПУ РЗА фирмы Siemens в соответствии со своими функциями предназначены для использования на энергетических объектах в системах нормальной эксплуатации, важных для безопасности и в системах аварийного электропитания.

Функции МПУ РЗА фирмы Siemens:

- дистанционная защита от междуфазных КЗ;
- дистанционная защита от КЗ на землю;
- автоматическое повторное включение;
- контроль синхронизма;
- защита от повышения напряжения;
- токовая защита обратной последовательности;
- токовая ступенчатая защита;
- направленная токовая ступенчатая защита;
- блокировка от качаний;
- переключение групп установок;
- логика приема и передачи телесигналов;
- осциллографирование;
- одностороннее дистанционное определение места повреждения;
- контроль исправности цепей управления;
- устройство резервирования отказа выключателя

В соответствии с ГОСТ Р 50746–2000 по электромагнитной совместимости системы нормальной эксплуатации должны соответствовать III группе исполнения, а системы аварийной эксплуатации – IV группе исполнения.

В задачу анализа соответствия МПУ РЗА фирмы Siemens требованиям электромагнитной совместимости по параметрам, приведенным в сертификате МПУ РЗА, входит и определение возможности его использования в системах аварийного электропитания.

В табл. 3.5 приведены значения коэффициентов запаса ( $K_{ЭМО}$ ) по устойчивости МПУ РЗА к электромагнитным воздействиям, которые определяются как отношение значений нормируемых воздействий, приведенных в сертификате МПУ РЗА фирмы Siemens, к значениям параметров реальной электромагнитной обстановки в местах размещения и использования микропроцессорных устройств релейной защиты.

Отдельные характеристики ЭМС в сертификате не приводятся, вследствие чего невозможно определить многие коэффициенты запаса. Кроме того, коэффициент запаса по устойчивости к колебательным затухающим помехам частотой 1 МГц (основной вид электромагнитных воздействий на ОРУ 750) меньше единицы. Поэтому рекомендовано проводить лабораторные испытания МПУ РЗА фирмы Siemens на соответствие требованиям электромагнитной совместимости, регламентированные стандартом ГОСТ Р 50746–2000. По результатам испытаний определяется эксплуатационный коэффициент запаса по устойчивости ( $K_{уст}$ ) МПУ РЗА к электромагнитным воздействиям, который представляет собой отношение значений параметров реальной

**Электромагнитная обстановка в местах размещения и использования МПУ РЗА фирмы Siemens на подстанции ВЛ Курская АЭС – ПС Северо-Украинская**

№ п/п	Виды электромагнитных воздействий	Стандарт	Источник помех	Максимальные значения электромагнитных воздействий				
				РЩ	ОРУ-750	Цели тока	Цели напряжения	Цели питания оперативного тока
1	Магнитные поля промышленной частоты	ГОСТ Р 50648; МЭК 61000-4-8	Пылесос	90 А/м	-	-	-	-
			КЗ в сети питания	470 А/м	-	-	-	-
			Под проводом ВЛ при 300 МВт	-	10,6 А/м	-	-	-
2	Импульсное магнитное поле	ГОСТ Р 50649; МЭК 61000-4-9	КЗ фазы трансформатора на «землю»	-	300 А/м	-	-	-
			Удаленный грозовой разряд	0,5 А/м	-	-	300 В	-
3	Загущающее колебательное магнитное поле частотой 1 МГц	ГОСТ Р 50652; МЭК 61000-4-10	Грозовой разряд в молниеприемник на расстоянии 50 м от РЩ	300 А/м	-	-	3 кВ	-
			Коммутация ВВ разрядника	0,5 А/м	-	-	-	-
			Коммутация в цепях нагрузки	2 А/м	-	-	-	-

4	Полевые промышленные радиопомехи в окружающем пространстве в полосе 30-1000 МГц от стационарного оборудования	ГОСТ Р 51318.11.1; СИСПр-11.1	Радиостанция «Алтай»	100 дБ	-			
			Реактор ВЛ 750кВ	-	100 дБ			
			Фоновая составляющая	70 дБ	70 дБ			
			Радиостанция 27 МГц	1 дБ	-			
5	Кондуктивные индустриальные радиопомехи в цепях тока и напряжения МПРЗ, в цепях оперативного постоянного тока (КРЧП) в полосе 0,15-30 МГц, навигационным оборудованием	ГОСТ Р 51317.4.6; МЭК 61000-4-6	Радиостанция «Siemens» 970 МГц	110 дБ	-			
			Пылесос	60 дБ	-			
			Штатный кабель	-	82 дБ норма 79 дБ	90 дБ норма 79 дБ	95 дБ норма 79 дБ	
			Кабель КВВГЭ не заземлен	-	-	-	30 дБ норма 79 дБ	
			Кабель КВВГЭ заземлен со стороны МПРЗ	-	-	-	50 дБ норма 79 дБ	
			Кабель КВВГЭ заземлен с двух сторон	-	-	-	65 дБ норма 79 дБ	
			Кабель связи без ферритового фильтра	-	-	-	85 дБ норма 79 дБ	
			Кабель связи с ферритовым фильтром	-	-	-	70 дБ норма 79 дБ	

№ п/п	Виды электромагнитных воздействий	Стандарт	Источник помех	Максимальные значения электромагнитных воздействий				
				РЦ	ОРУ-750	Цены тока	Цены напряжения	Цены питания оперативного тока
6	Микросекундные импульсы в период нормальной эксплуатации	ГОСТ Р 51317.4.5; МЭК 61000-4-5	Сеть питания	-	-	1,0 А	300 В	-
7	Затухающие импульсы в период нормальной эксплуатации	ГОСТ Р 51317.4.12; МЭК 61000-4-12	Сеть питания	-	-	1,7 В	2 В	-
8	Прерывания напряжения 300 мкс	ГОСТ Р 51317.4.11; МЭК 61000-4-11	Сеть питания	-	-	-	-	11 В
9	Пачки импульсных наносекундных помех	ГОСТ 30804.4.4; МЭК 61000-4-4	Сеть питания	-	-	-	4,5 В	-
10	Общий коэффициент искажения гармоник	ГОСТ 30804.4.13; МЭК 61000-4-13	Сеть питания	-	-	-	23 %	-
11	Колебания напряжения сети питания	ГОСТ Р 51317.4.14; МЭК 61000-4-14	Сеть питания	-	-	-	-	30 %
12	Затухающие импульсные помехи	ГОСТ Р 51317.4.12; МЭК 61000-4-12	Отключение ВВ разъединителя	-	-	-	1,5 кВ провод-провод 4,5 кВ провод-земля	-
			Включение ВВ разъединителя	-	-	-	1,3 кВ	-
			Отключение ВВ выключателя	-	-	-	0,5 кВ	-

Сравнительный анализ требований стандартов по электромагнитной совместимости по цепям тока, напряжения, цепям питания оперативного тока и в целом

Виды воздействий	РД 34.35.310–97	Сертификат МПУ РЗА Siemens	EN 50082	ГОСТ Р 50746-2000		Коэффициент запаса $K_{ЭМО}$ МПУ РЗА Siemens
				Группы исполнения		
				III	IV	
Радиочастотные электромагнитные поля в диапазоне 80–1000 МГц	10 В/м	10 В/м	–	10 В/м	10 В/м	10
Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями в диапазоне 0,15–80 МГц	–	10 В	–	10 В	10 В	20
Микросекундные импульсные помехи большой энергии: провод–провод провод–земля	±2 кВ ±4 кВ	±1 кВ ±2 кВ	±1 кВ ±2 кВ	±1 кВ ±2 кВ	±2 кВ ±4 кВ	3
Динамические изменения напряжения сети электропитания: провалы на 30 % выбросы на 20 % прерывания на 100 %	0,5 с – 0,1 с	– – –	0,1 с – 5 с	1 с 1 с 0,1 с	2 с 2 с 0,2 с	Нет данных
Наносекундные импульсные помехи: сеть переменного тока сеть постоянного тока порт управления	±4 кВ – ±2 кВ	±4 кВ – –	±2 кВ – ±1 кВ	±2 кВ ±1 кВ ±1 кВ	±4 кВ ±2 кВ ±2 кВ	Нет данных
Электростатические разряды воздушные контактные	±8 кВ ±6 кВ	±15 кВ ±8 кВ	±8 кВ ±6 кВ	±6 кВ ±8 кВ	±15 кВ ±8 кВ	2

Виды воздействий	РД 34.35.310-97	Сертификат МПУ РЗА Siemens	EN 50082	ГОСТ Р 50746-2000		Коэффициент запаса $K_{ЭМО}$ МПУ РЗА Siemens
				Группы исполнения		
				III	IV	
Магнитное поле промышленной частоты: длительно кратковременно, 3 с	30 А/м	30 А/м	30 А/м	30 А/м	40 А/м	2
	-	-	-	400 А/м	600 А/м	Нет данных
Импульсное магнитное поле	± 300 А/м	± 300 А/м	-	± 300 А/м	± 600 А/м	1
Затухающее колебательное магнитное поле	-	-	-	30 А/м	100 А/м	Нет данных
Колебательные затухающие помехи частотой 1 МГц: а) по сети переменного тока: провод-провод провод-земля	1,0 кВ	1,0 кВ	-	1,0 кВ	1,0 кВ	0,7
	2,5 кВ	2,5 кВ	-	2,0 кВ	2,5 кВ	0,6
б) по сети постоянного тока: провод-провод провод-земля	-	-	-	0,5 кВ	1,0 кВ	Нет данных
	-	-	-	1,0 кВ	2,0 кВ	Нет данных
Изменения частоты в сети электропитания	-	-	-	± 15 %	± 15 %	Нет данных
Колебания напряжения электропитания	-	-	-	± 12 %	± 20 %	Нет данных
Кондуктивные помехи в полосу частот 0-150 кГц	-	-	-	10 В	30 В	Нет данных
Токи кратковременных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления	-	-	-	150 А	200 А	Нет данных
Токи микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления	-	-	-	150 А	200 А	Нет данных

помехоустойчивости, приведенным в протоколе испытаний, к регламентированным значениям параметров электромагнитных воздействий для установленной стандартом ГОСТ Р 50746–2000 группы исполнения МПУ РЗА в соответствии с назначением и влиянием их на надежность работы электронного оборудования.

При проведении испытаний МПУ РЗА на соответствие требованиям электромагнитной совместимости по месту эксплуатации определяются коэффициенты оперативного запаса ( $K_{опз}$ ) по устойчивости к электромагнитным воздействиям как отношение значений параметров реальной помехоустойчивости, приведенным в протоколе испытаний, к параметрам реальной электромагнитной обстановки, приведенным в протоколе измерений параметров в период обследования электромагнитной обстановки по месту эксплуатации.

Для предварительной оценки соответствия МПУ РЗА требованиям устойчивости к электромагнитным воздействиям проектные организации используют понятие проектного коэффициента запаса ( $K_{пр}$ ) по устойчивости к электромагнитным воздействиям, который определяется как отношение значений параметров устойчивости к электромагнитным воздействиям, приведенным в сертификате на МПУ РЗА, к регламентированным значениям параметров электромагнитных воздействий для установленной стандартом ГОСТ Р 50746–2000 группы исполнения МПУ РЗА в соответствии с их назначением и влиянием на безопасность ЭО.

Знание коэффициентов запаса по устойчивости к электромагнитным воздействиям позволяет корректно подходить как к выбору энергетического оборудования для включения его в проекты, так и к определению необходимости проведения лабораторных испытаний или испытаний по месту эксплуатации ЭО для подтверждения их соответствия регламентируемым требованиям электромагнитной совместимости.

При проектировании новых объектов атомной энергетики, а также реконструкции и продления ресурса действующих энергоблоков АЭС осуществляется переход на новую (в основном микропроцессорную) элементную базу систем контроля, защиты и управления.

В этих условиях проблема электромагнитной совместимости приобрела весьма важное значение как для эксплуатирующих, так и для проектных организаций, поэтому разветвленные устройства управления, релейной защиты, автоматизированного управления, измерений, связи, сигнализации и другие подвергаются разнообразным внешним и внутренним электромагнитным воздействиям в нормальных и аварийных режимах (см. гл. 1).

Этими воздействиями определяется электромагнитная обстановка, характеризующаяся уровнями помех.

Уровни воздействующих помех можно регулировать различными техническими мероприятиями. К таким мероприятиям относятся выбор режима работы (например, ограничение токов короткого замыкания, регулирование напряжения, частоты, алгоритма оперативных переключений и т.д.), обеспечение молниезащиты, заземление, экранирование, прокладка электрических коммуникаций, уравнивание и выравнивание потенциалов, использование защитных устройств, ограничивающих перенапряжения (например, разрядников, ограничителей перенапряжений, варисторов, ограничительных диодов, комбинированных устройств), фильтров, использование строительных конструкций в качестве экранов, рациональное размещение оборудования и многое другое.

Задачей обеспечения электромагнитной совместимости является согласование испытательных уровней и уровней воздействий ТС. Для того чтобы реализовать это согласование, могут потребоваться дополнительные технические мероприятия для облегчения электромагнитной обстановки в местах расположения ТС или на сетевых, сигнальных, информационных или иных электрических входах технических средств.

Во многих случаях электромагнитную обстановку определяют экспериментально, так как на объектах электроэнергетики она является сложной и трудно поддается расчетам. Для этого необходимо разрабатывать специальные методики и устройства.

Рассмотрим основные виды и параметры электромагнитных воздействий на технические средства электрической части атомных электростанций.

В работе [2] установлены уровни различных испытательных воздействий при испытаниях технических средств. Это означает, что электромагнитная обстановка в месте установки технического средства должна характеризоваться более низкими параметрами, чем испытательные.

Принято разделять воздействия (или электромагнитные помехи) на кондуктивные (распространяющиеся по проводам), полевые и обусловленные качеством электроэнергии сети электропитания. Нормированные виды электромагнитных помех приведены в табл. 3.6–3.8 [2].

Сопоставление данных табл. 3.6–3.8, позволяет сделать вывод о том, что электромагнитная совместимость на объектах энергетики во многих случаях не обеспечивается.

### **3.3. Электромагнитная обстановка на атомных электростанциях**

#### **Методика и результаты обследования электромагнитной обстановки на АЭС.**

В настоящее время методику комплексного обследования электромагнитной обстановки на АЭС России только разрабатывают [13], а в доступной авторам иностранной литературе о такой постановке задачи не упоминается; обычно каждый автор ограничивается рассмотрением частных вопросов общей задачи [14]. Тем не менее при разработке методики комплексного обследования электромагнитной обстановки на объектах АЭС авторы работы [13] использовали результаты этих разрозненных работ.

Ими приведены сведения о значениях амплитуд затухающих колебательных импульсных помех на входах устройств релейной защиты (РЗ) при коммутации разъединителем на контрольных кабелях разного вида, проложенных под сборными шинами ОРУ разного класса напряжения. Для оценки порядка величин и влияния отдельных внешних факторов конкретные численные значения этих амплитуд (кВ) указаны ниже.

Класс напряжения ПС .....	110 кВ	220 кВ	380 кВ
Кабель без оболочки .....	2,2 кВ	2,7 кВ	4,8 кВ
Кабель с броней из стальной ленты .....	1,2 кВ	1,8 кВ	3,0 кВ
Кабель с медным плетеным экраном .....	0,25 кВ	0,40 кВ	0,60 кВ
Кабель со сплошным экраном из цветного металла .....	0,20 кВ	0,25 кВ	0,40 кВ

Примечание. Экраны кабелей заземлены с обоих концов.

Таблица 3.6

### Нормированные и измеренные значения кондуктивных электромагнитных помех на объектах энергетики

Воздействие	Предельное нормированное воздействие при группе использования				Измеренные значения
	I	II	III	IV	
Микросекундные импульсные помехи большой энергии, кВ	До 0,5	0,5–1,0	0,5–2,0	1,0–4,0	При обратных переключениях наблюдаются импульсы амплитудой до 5–10 кВ
Наносекундные импульсные помехи (пачки импульсов), кВ	До 0,5	0,5–1,0	0,5–3,0	2,0–4,0	Уровни помех 4,5 кВ в цепях трансформаторов напряжения
Разряды статического электричества, кВ	2,0	4,0	6 – контакт, 8 – искра	8 – контакт, 15 – искра	Данных не имеется
Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями, В	1,0	3,0	10,0	10,0	Превышения нормированного уровня помех
Коллебельные заглушающие помехи, кВ	До 0,5	0,25–1,0	0,5–2,0	1,0–4,0	Помехи амплитудой до 4,8 кВ
Кондуктивные помехи (полоса частот 0–150 кГц), В	0,1–1,0	0,3–10,0	1,0–30,0	3,0–100,0	Превышения достигают 15–20 дБ
Токи кратковременных (3 с) синусоидальных помех 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления, А	50,0	100,0	150,0	200,0	Данных не имеется
Токи микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления (импульс 4/300 мкс), А	50,0	100,0	150,0	200,0	Данных не имеется

Таблица 3.7

### Нормированные и измеренные значения наибольших полевых электромагнитных полей

Воздействие	Предельное нормированное воздействие при группе исполнения				Измеренные значения
	I	II	III	IV	
Радиочастотное электромагнитное поле, В/м	1,0–3,0	3,0–10,0	10,0–30,0	10,0–30,0	Напряжения, превышающие нормированные в 2 раза
Магнитное поле промышленной частоты, А/м: длительное кратковременное	3,0	10,0	30,0	40,0	Напряженность 90 А/м (длительное воздействие)
	–	400,0	400,0	600,0	
Импульсное магнитное поле (8/20 мкс), А/м	–	100,0	300,0	600,0	Данных не имеется, однако при неудачных перекрытиях изоляции возможны более высокие напряженности
Затухающее колебательное магнитное поле длительностью до 10 с, А/м	–	10,0	30,0	100,0	Напряженность более 400 А/м (при КЗ)

Таблица 3.8

**Нормированные и измеренные значения наибольших электромагнитных помех, обусловленных качеством электропитания**

Воздействие	Предельное нормированное воздействие при группе исполнения				Измеренные значения
	I	II	III	IV	
Изменения частоты питающего напряжения, %	±3	+4, -6	±15	±15	Как правило, отклонение частоты не выходит за указанные пределы
Искажения синусоидальности напряжения электропитания (наибольшая амплитуда гармоник, % от основной)	-	До 9	До 12	В соответствии с ТЗ и ТС	Данные об искажениях отсутствуют
Динамические изменения напряжения электропитания: провалы напряжения на 70 %, с прерывания напряжения, мс выбросы напряжения, 120 %, с	0,2 20,0 0,2	0,5 50,0 0,5	1,0 100,0 1,0	2,0 200,0 2,0	Более глубокие провалы Прерывания большей длительности В цепях постоянного оперативного тока наблюдаются наведенные напряжения 50 Гц амплитудой до 125 В

Существенное влияние на значение наведенного напряжения оказывает входное сопротивление нагрузки, особенно для экранированных кабелей.

Соответствующие данные для кабеля с экраном из медной оплетки при волновом сопротивлении 50 Ом приведены ниже.

Сопротивление нагрузки кабеля, Ом .....	600 000	600	100	50
Среднее значение амплитуды наведенного напряжения, В .....	302	11	5,98	4,6

При удалении кабеля от шин амплитуда помехи сильно снижается; в работе [13] приведены экспериментальные данные, показывающие, что при удалении кабеля от коммутируемых шин на 7–10 м амплитуда помехи снижается в 3–4 раза.

В контрольных кабелях, подключенных к емкостным измерительным трансформаторам, по зарубежным данным амплитуды помех, существенно выше, чем указывалось ранее.

Класс напряжения, кВ .....	110	220	380
Амплитуда помехи без мер по защите от помех, кВ .....	1,6	5,5	12
Амплитуда помехи при использовании мер по защите от помех, кВ .....	1,5	2,5	2

Наводки на другие контрольные кабели при однофазных коротких замыканиях на линиях находятся в пределах 50–500 В.

В подобной ситуации и с учетом того, что элементы ОРУ подвержены действию молниевых разрядов и многих других внешних электромагнитных воздействий регулярного и случайного характера, а также чрезвычайно важного фактора – состояния заземляющего устройства ОРУ для работы электрооборудования практически всей АС, авторы работы [13] сочли целесообразным сделать, прежде всего, попытку разработать методику обследования электромагнитной обстановки на открытых распределительных устройствах сверхвысокого напряжения АС.

В соответствии с природой источников помех и практическим опытом при обследовании электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики АЭС, на ОРУ высокого и сверхвысокого напряжений, необходимо выполнить следующие работы:

- проверить целостность контура заземления ОРУ и целостность присоединений оборудования и конструкций ОРУ к контуру заземления;
- выполнить коммутации разъединителями ненагруженных участков шин ОРУ с одновременной регистрацией кондуктивных импульсных помех на входах кабелей от трансформаторов тока и напряжения к устройствам релейной защиты;
- измерить промышленные радиопомехи в цепях трансформаторов тока, напряжения и в цепях оперативного постоянного тока;
- измерить напряженности магнитного поля промышленной частоты в помещении релейного щита в нормальных условиях (фоновое поле) и при коротком замыкании в сети питания 220 В переменного тока;
- измерить напряженности затухающего колебательного магнитного поля при коммутации – участков шин разъединителями на ОРУ и при коммутационных переключениях в помещении релейного щита;
- измерить напряженности радиочастотных электромагнитных полей в нормальных режимах работы оборудования в разное время суток (мониторинг фонового поля) и выполнить те же измерения при работе устройств мобильной радиосвязи и электроприборов (пылесоса, электродрели и пр.) в помещении релейного щита;

- провести мониторинг напряжений и регистрацию импульсных явлений в цепях трансформаторов тока, напряжения и в цепях оперативного постоянного тока;
- в соответствии с рекомендациями [15] выполнить имитационные эксперименты, необходимые для последующих расчетов параметров редких явлений и соответствующих им параметров помех, воспроизвести которые в натуре невозможно (короткие замыкания, разряды молний на молниеприемники или элементы конструкций ОРУ);
- измерить потенциалы электростатических зарядов оперативного персонала при работе на изолирующих подставках в условиях низкой влажности в помещении релейного щита;
- проанализировать результаты проведения обследования электромагнитной обстановки на ОРУ и при необходимости дать рекомендации проектным организациям по применению устройств защиты от недопустимого для оборудования уровня помех.

Далее приводятся некоторые результаты исследований электромагнитной обстановки на действующем энергоблоке АС.

**Магнитные поля в помещении релейного щита ОРУ сверхвысокого напряжения.** В процессе эксплуатации оборудование релейного щита постоянно находится в окружении электротехнических устройств, токи которых создают магнитные поля, образующие в итоге некоторое среднее, слабо изменяющееся по амплитуде во времени, фоновое магнитное поле промышленной частоты. Для измерения этого поля необходима установка датчиков магнитного поля в трех пространственных координатах и соответствующего измерителя.

На рис. 3.1 представлены совмещенные осциллограммы магнитного поля промышленной частоты, зафиксированные в разные дни и время суток. Анализ этих осциллограмм показывает, что напряженность фонового магнитного поля 50 Гц в месте измерений не превышает значения 1 А/м.

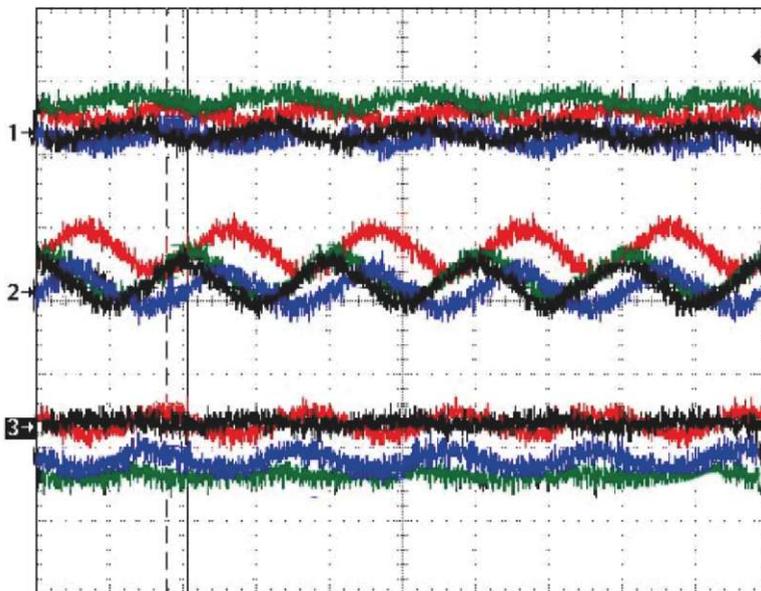
Кроме фонового магнитного поля промышленной частоты, оборудование релейного щита может подвергаться и действию магнитного поля от источников случайного характера, к которым следует отнести электроинструмент, использование которого бывает необходимым в условиях эксплуатации, и короткие замыкания, которые могут произойти в сети 220 В, 50 Гц релейного щита. Соответствующие явления были воспроизведены при обследовании релейного щита.

На рис. 3.2 приведены осциллограммы напряженности магнитного поля промышленной частоты при работе пылесоса, применяющегося при обработке панелей релейной защиты.

Эти осциллограммы позволяют сделать вывод о том, что напряженность сравнительно длительно действующего магнитного поля не превышает 90 А/м в самом неблагоприятном случае (на расстоянии 1 см над пылесосом при пуске пылесоса под нагрузкой).

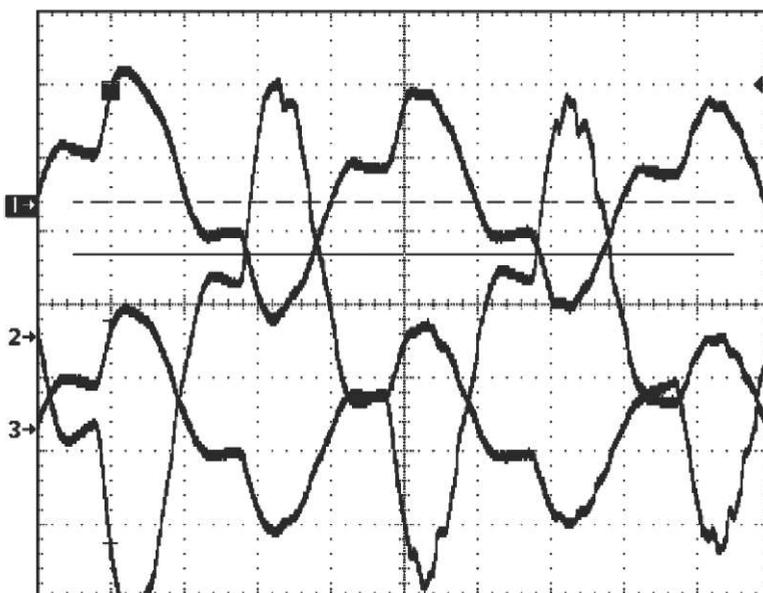
На рис. 3.3 приведены осциллограммы напряженности магнитного поля при коротком замыкании длительностью 0,01 с в сети 220 В релейного щита. Они показывают, что при коротком замыкании в сети релейного щита микропроцессорная релейная защита может подвергаться кратковременному действию магнитного поля промышленной частоты напряженностью более 400 А/м в самом неблагоприятном случае.

По результатам измерений можно утверждать, что при испытаниях на устойчивость к действию магнитного поля промышленной частоты устройств контроля, защиты и управления, установленных в помещении релейного щита, следует принять напряженности испытательного поля 100 А/м в длительном режиме и 600 А/м для кратковременного воздействия (до 3 с).



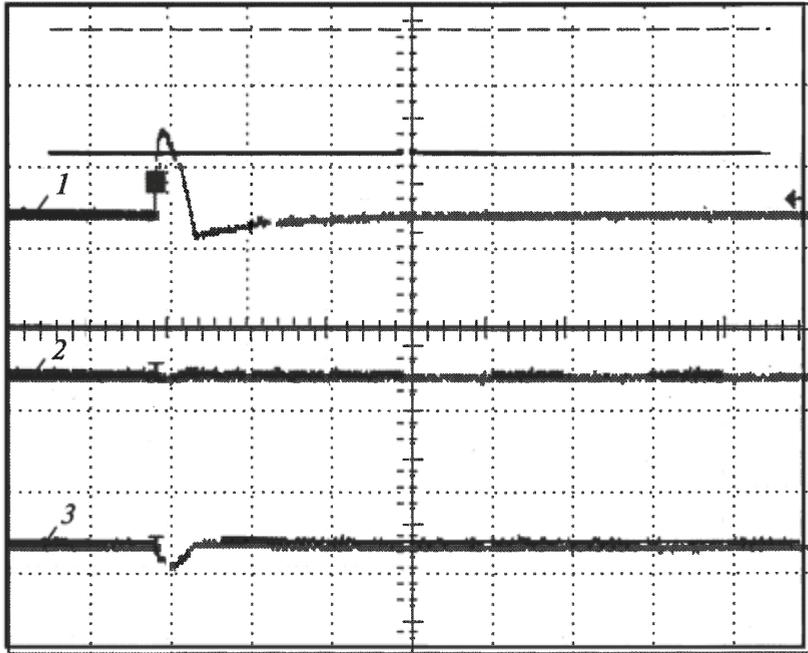
**Рис. 3.1. Совмещенные осциллограммы напряженности магнитного поля промышленной частоты в трех координатах в разное время рабочих дней ( $H_{\max} = 0,6$  А/м, масштаб времени 100 мс/дел.):**

кривые 1 – вертикальная составляющая напряженности; кривые 2 – горизонтальная составляющая; кривые 3 – вторая ортогональная горизонтальная составляющая



**Рис. 3.2. Напряженности магнитного поля 50 Гц (амплитуда ~90 А/м) при включении в работу бытового пылесоса в помещении релейного щита при расположении трехкоординатного датчика магнитного поля на расстоянии 1 см над пылесосом (масштаб времени 4 мс/дел.):**

кривые 1 – вертикальная составляющая напряженности; кривые 2 – горизонтальная составляющая; кривые 3 – вторая ортогональная горизонтальная составляющая



**Рис. 3.3. Напряженности магнитного поля промышленной частоты амплитудой 469 А/м, зафиксированные трехкоординатным датчиком магнитного поля, расположенным в 10 см от токоведущего провода при имитации короткого замыкания в сети 220 В переменного тока релейного щита ОРУ (масштаб времени 20 мс/дел.):**

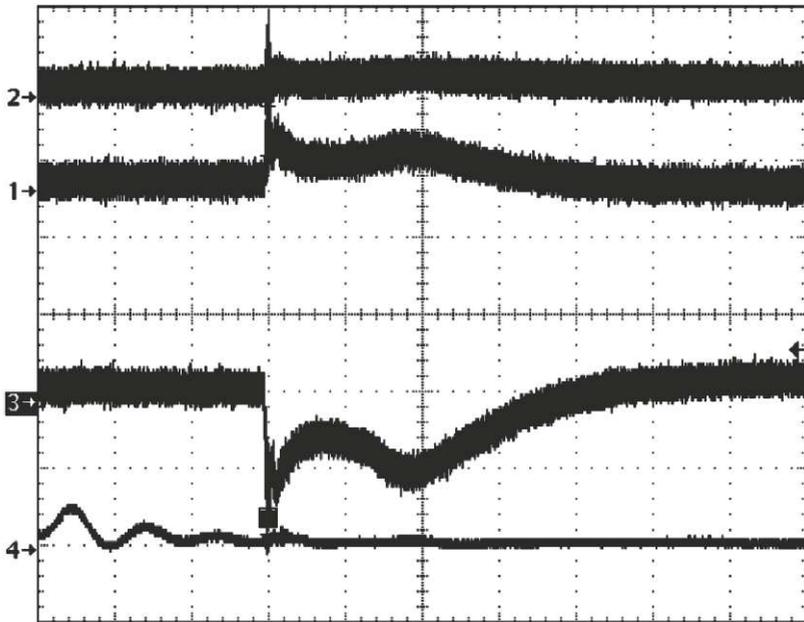
кривые 1 – вертикальная составляющая напряженности; кривые 2 – горизонтальная составляющая; кривые 3 – вторая ортогональная горизонтальная составляющая

**Импульсные магнитные поля.** В процессе эксплуатации оборудование релейного щита может подвергаться действию импульсного магнитного поля, возникающего в результате протекания тока молниевых разряда в расположенных поблизости металлоконструкциях. Сложность измерения амплитуды напряженности такого магнитного поля заключается в случайной природе разряда молнии, что требует постоянного длительного и непрерывного контроля ситуации (как минимум в течение грозового сезона). При выполнении данной работы такой возможности не было по причине отсутствия соответствующей техники, да и сама по себе необходимость в этом не столь очевидна, так как разряд молнии и его эффекты изучены достаточно хорошо [5, 10]. Однако удалось зафиксировать факт появления импульсного магнитного поля в месте установки микропроцессорной релейной защиты в здании релейного щита, однозначно вызванного разрядом молнии во время грозы.

На рис. 3.4 представлены осциллограммы напряженностей импульсного магнитного поля в трех координатах, которые были зарегистрированы во время грозы при молниевых разрядах на значительном удалении от ОРУ. Результирующие амплитуды напряженности этих полей невелики (0,5 А/м), но импульсы имеют весьма крутые фронты.

Даже удаленные разряды молнии проявляют себя в помещении релейного щита, что свидетельствует о весьма слабых защитных свойствах здания.

При более близких разрядах следует ожидать возникновения помех с большими амплитудами.



**Рис. 3.4. Напряженности импульсного магнитного поля при разряде молнии вне территории ОРУ (масштаб времени 20 мс/дел.):**

кривые 1 – вертикальная составляющая напряженности; кривые 2 – горизонтальная составляющая; кривые 3 – вторая ортогональная горизонтальная составляющая

**Затухающее колебательное магнитное поле.** В процессе эксплуатации оборудование релейного щита может подвергаться действию затухающего колебательного магнитного поля, возникающего, например, при протекании затухающих колебательных импульсов тока в ошиновке ОРУ, при коммутациях находящихся под напряжением, но обесточенных участков шин.

При выполнении коммутаций разъединителями на ОРУ в процессе выполнения натурных экспериментов по обследованию электромагнитной обстановки на ОРУ с помощью оборудования, применявшегося при исследовании импульсного магнитного поля, были получены осциллограммы напряженности затухающего колебательного магнитного поля, свидетельствующие о том, что колебания этого поля едва выделяются на уровне фонового магнитного поля. Это нетрудно объяснить большой удаленностью коммутируемых шин от места измерений (не менее 150 м).

Другим источником затухающего колебательного магнитного поля может быть затухающий ток высокочастотного переходного процесса, возникающий при отключении индуктивных нагрузок постоянного или переменного тока. Для исследования таких ситуаций выполнялся активный эксперимент по отключению различных электроприборов от сети 220 В переменного тока релейного щита и проводилась обычная регистрация состояния магнитного поля в месте установки микропроцессорной релейной защиты. Так как в период выполнения регистрации полей выполнялись профилактические и наладочные работы в помещении релейного щита, то, естественно, наблюдались и коммутации в цепи питания постоянного тока 220 В.

Регистрация магнитных полей при выполнении различных работ на релейном щите позволила выделить наиболее характерную осциллограмму напряженности

затухающего колебательного магнитного поля (рис. 3.5), по которой его напряженность оценивается в 1,7 А/м, а частота в 2 МГц.

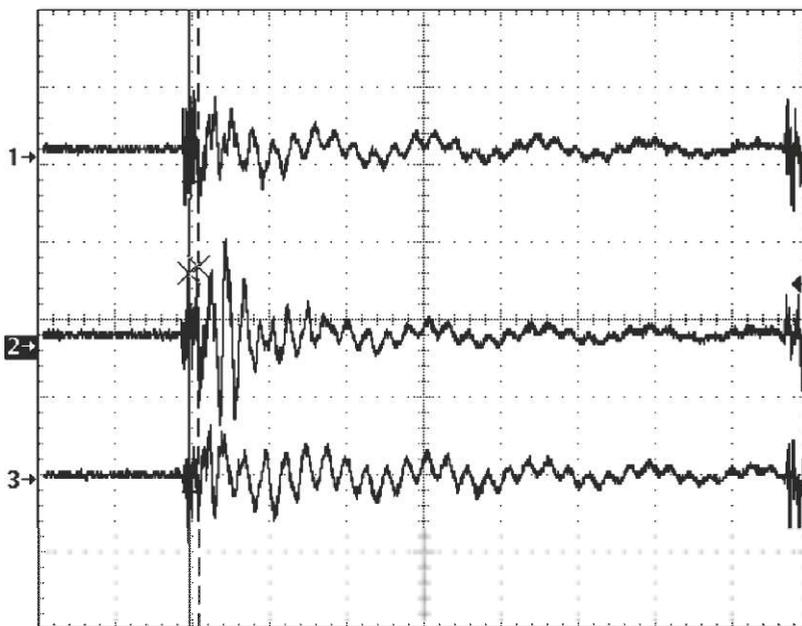


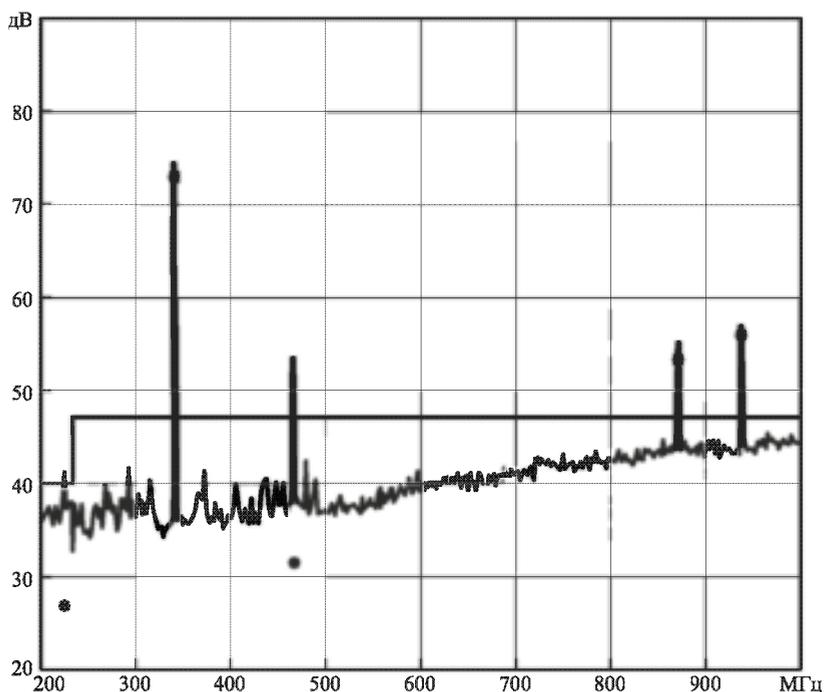
Рис. 3.5. Оциллограммы импульсов затухающего колебательного магнитного поля при выполнении коммутации в процессе наладки защит и контакторов, производимых персоналом в помещении релейного щита ОРУ ( $H_{\max} = 1,7$  А/м,  $f = 2$  МГц)

Радиочастотные электромагнитные поля в помещении релейного щита и на ОРУ АЭС. В процессе эксплуатации оборудование релейного щита и подходящие к нему цепи постоянно находятся в электромагнитных полях очень широкого диапазона частот. Среди этих электромагнитных полей и частот в стандартах РФ по испытаниям на ЭМС [2] выделяются обязательные для испытаний на устойчивость к действию электромагнитных полей диапазоны 30–230 и 230–1000 МГц (так называемые радиочастотные электромагнитные поля). Измерения параметров радиочастотных электромагнитных полей являются обязательными при обследовании электромагнитной обстановки на объекте.

Диапазон частот менее 30 МГц рассматривается в российском стандарте [2] при испытаниях на устойчивость к кондуктивным радиочастотным помехам в цепях питания и управления. Однако при исследовании электромагнитной обстановки на объекте полезно определить источник помех и поэтому нельзя игнорировать взаимосвязи электромагнитного поля частотой ниже 30 МГц и токов этих частот в цепях микропроцессорной релейной защиты.

Так как определение параметров электромагнитного поля имеет своей целью не только разработку требований к испытательным воздействиям, но и разработку рекомендаций по защите от вредных влияний поля на оборудование релейного щита в широком диапазоне частот, то диапазон исследования поля был выбран максимально широким от 9 кГц до 1000 МГц в трех поддиапазонах: 9 кГц–1 МГц; 20–265 МГц; 200–1000 МГц.

На рис. 3.6 представлен типичный спектр напряженности радиочастотного электромагнитного поля в диапазоне 200–1000 МГц.



**Рис. 3.6. Типичный частотный спектр напряженности радиочастотного электромагнитного поля в диапазоне 200–1000 МГц, зарегистрированного в помещении релейного щита, вертикальная поляризация, направление «Север»:**  
горизонтальная линия – уровень допустимых помех

Сравнительный анализ полученных спектров позволяет констатировать наличие стабильных источников радиочастотного электромагнитного поля в направлении «Восток» на частоте 338 МГц, что соответствует реально существующей системе локальной радиотелефонной сети «Алтай».

Выброс напряженности электромагнитного поля на этой частоте достигает 100 дБ (100 мВ/м), что превышает допустимые стандартом РФ пределы по эмиссии более чем в 2 раза.

**Фоновое радиочастотное электромагнитное поле на открытой территории ОРУ в диапазоне частот 200–1000 МГц.** На рис. 3.7 представлен характерный спектр для направления «Север» вертикальной компоненты радиочастотного электромагнитного поля (пиковые значения) в месте установки реакторов на ОРУ. в диапазоне 200–1000 МГц были выполнены измерения в 8000 точках значений частоты в каждом из обследуемых мест ОРУ.

Измерения проводили в четырех характерных точках ОРУ 750 кВ. Наибольшее значение напряженности поля (102,5 дБ) получено в направлении «Север» для вертикальной компоненты электромагнитного поля на частоте примерно 338 МГц вблизи реакторов (см. рис. 3.7).

В результате сопоставления спектров напряженностей радиочастотного электромагнитного поля для диапазона 200–1000 МГц в релейном щите с осциллограммами

в разных точках ОРУ можно констатировать, что напряженность на ОРУ в среднем на 20 дБ выше, чем в помещении релейного щита, что свидетельствует о плохих экранирующих свойствах здания релейного щита и о необходимости учета этого факта при выборе степени жесткости испытаний установленного там оборудования на устойчивость к действию радиочастотного электромагнитного поля.

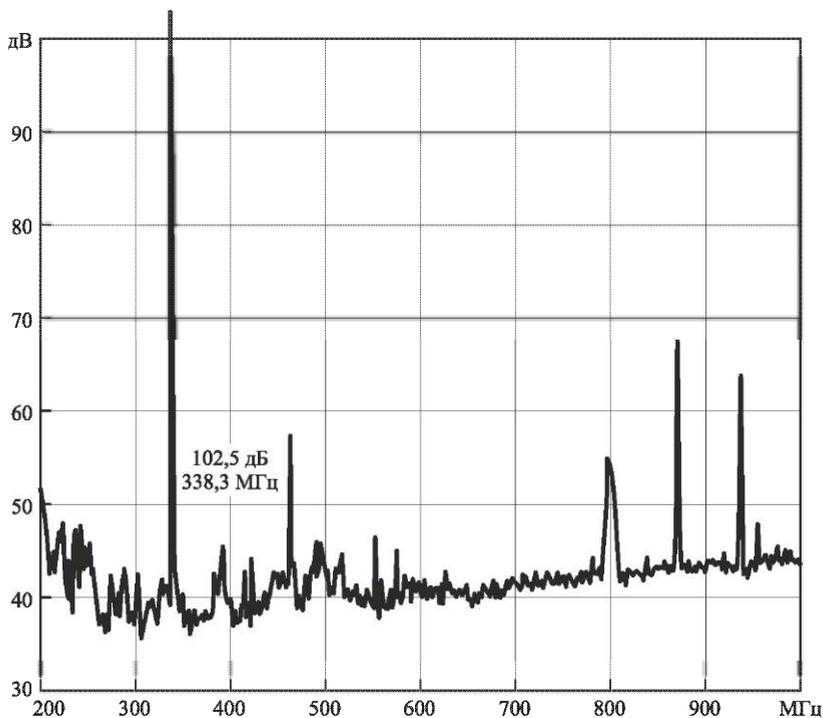


Рис. 3.7. Типичный спектр напряженности радиочастотного электромагнитного поля в диапазоне 200–1000 МГц в месте установки реакторной группы воздушных линий, вертикальная поляризация, направление «Север»

Кондуктивные радиочастотные помехи в цепях тока и напряжения микропроцессорной релейной защиты, в цепях оперативного постоянного тока, эффективность способов ограничения их уровня. Кондуктивные радиочастотные помехи являются очень опасными для микропроцессорных устройств электромагнитными воздействиями, распространяющимися по информационным, измерительным и силовым цепям, т.е. фактически являются направленными электромагнитными воздействиями, способными проникать в самые чувствительные элементы систем.

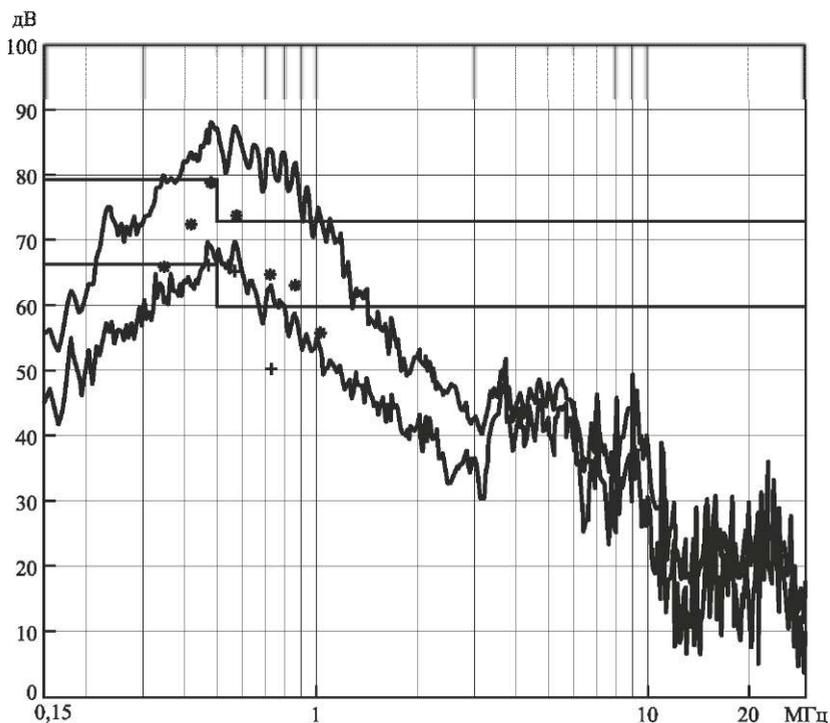
Источниками кондуктивных радиочастотных помех могут являться как внешние электромагнитные поля, наводящие потенциалы или токи на жилах измерительных цепей и цепей питания микропроцессорной релейной защиты, так и токи и потенциалы, наведенные расположенными в одном пучке соседними высокочастотными кабелями (диафония) и подключенные к данной сети устройства (что особенно характерно для разветвленной сети питания постоянного тока). В стандартах РФ предусмотрены соответствующие испытания на эмиссию кондуктивных радиочастотных помех и на устойчивость к их действию.

Кондуктивные радиочастотные помехи характеризуются такими параметрами, как частота и напряжение. Причем напряжение измеряется на сопротивлении 50 Ом, по которому протекают специально отфильтрованные токи помех, а частота напряжения определяется специально настроенным приемником. Устройство, позволяющее выполнить эту фильтрацию при измерениях, получило название «эквивалент сети».

Таким образом, схема измерений кондуктивных радиочастотных помех представляет собой последовательное соединение выхода кабеля, в котором измеряется уровень помех, с входом «эквивалента сети», на выход которого подключен приемник-анализатор радиочастотных сигналов типа ESHS 10, имеющий дисплей для наблюдения за ходом измерений и включенный на выходе принтер для распечатки результатов измерений по форме, установленной стандартами МЭК и РФ.

Кроме собственно определения характеристик кондуктивных помех были выполнены эксперименты по использованию различных приемов уменьшения их уровня и проведены необходимые измерения непосредственно на исследуемом объекте. Далее приводятся результаты измерений и дан их анализ.

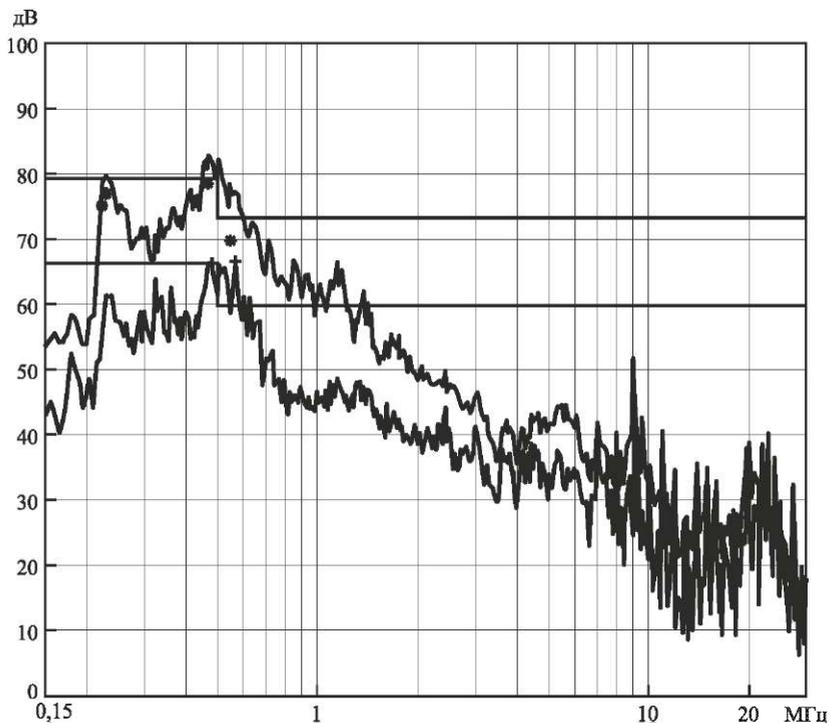
На рис. 3.8–3.10 представлены типичные спектры напряжений кондуктивных радиочастотных помех в цепях напряжения, тока и питания релейной защиты. Эти спектры сняты в один день с интервалом всего в несколько минут, что делает достаточно правомерным их сопоставление.



**Рис. 3.8. Типичные спектры напряжения кондуктивных радиочастотных помех в цепи напряжения микропроцессорной релейной защиты**

Все спектры имеют значительное сходство по конфигурации и характеризуются близкими частотами выбросов значений ординат кривых. Выбросы за допустимые

пределы значений напряжения кондуктивных помех (горизонтальные линии на рис. 3.8–3.10) характерны в большей степени для цепи напряжения, хотя имеют место и в остальных цепях.



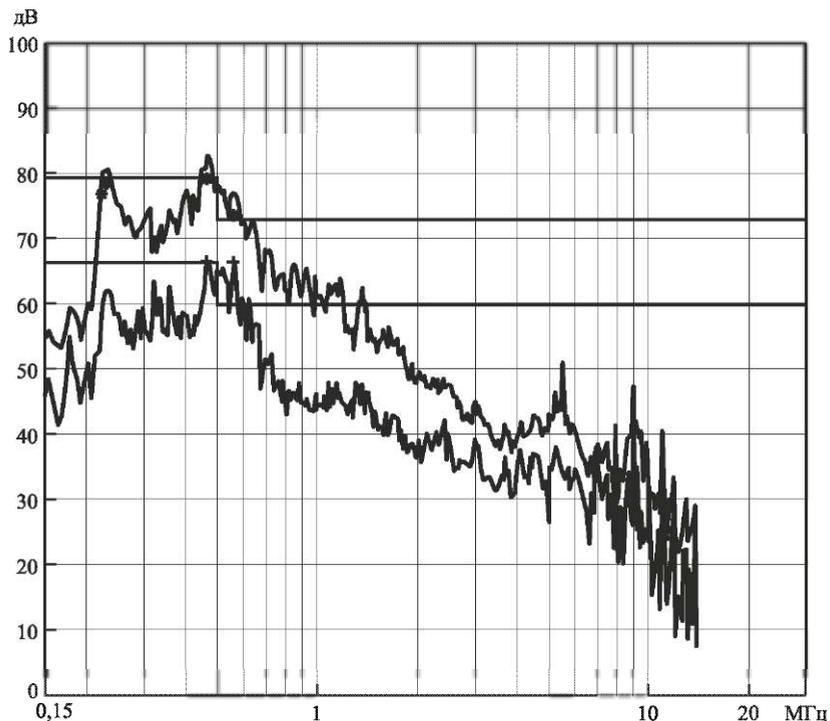
**Рис. 3.9. Типичные спектры напряжения кондуктивных радиочастотных помех в цепи тока микропроцессорной релейной защиты**

Для цепей питания постоянного тока микропроцессорной релейной защиты характерен наиболее высокий уровень напряжений кондуктивных помех в диапазоне 0,15–30,0 МГц, вследствие большой протяженности цепей и наличия большого количества подключенного к ним высокочастотного оборудования.

Следует отметить, что диапазон частот, определяющих наибольшие амплитуды выбросов, для всех рассмотренных цепей лежит в пределах 0,15–1,0 МГц, что приводит к заключению о преимущественно «внутреннем» происхождении кондуктивных радиочастотных помех (в этом диапазоне работают высокочастотные устройства, расположенные в помещении релейного щита).

На приведенных спектрах представлены лишь результаты конкретных измерений, однако их анализ в другие часы и дни обследования даст основания для обобщения этого вывода на ситуацию в целом.

По результатам исследования параметров кондуктивных радиочастотных помех в цепях тока и напряжения микропроцессорной релейной защиты и в сети постоянного тока можно сделать вывод о том, что непосредственное подключение этих цепей к микропроцессорной релейной защите приведет к появлению в соответствующих цепях защиты кондуктивных радиочастотных помех, превышающих в диапазоне 0,15–1,0 МГц допустимые по стандартам РФ пределы.



**Рис. 3.10. Типичные спектры напряжения кондуктивных радиочастотных помех в цепи питания постоянного тока**

Так как уровень напряжения кондуктивных радиочастотных помех превосходит допустимые значения, как для квазипиковых, так и для средних величин, то целесообразно рассмотреть технические решения по уменьшению уровня таких помех в этих кабелях. Наиболее простыми широко применяемыми решениями являются использование экранированных кабелей и установка фильтров.

При использовании экранированных кабелей, идущих от трансформаторов тока и напряжения, возникает проблема заземления, так как возможны различные варианты связи экрана с контуром заземления (с обоих концов, с одного конца, в середине длины, многократное, глухое, через емкости и пр.).

В данном случае характер электромагнитной обстановки в помещении релейного щита таков, что имеет смысл рассматривать только наиболее доступные способы заземления экрана, а именно: с обоих концов (возле клемм подключения к клеммам основного кабеля трансформаторов тока и напряжения, возле места установки микропроцессорной релейной защиты) и с одного конца (возле клемм подключения к микропроцессорной релейной защите).

Варианты заземления экрана были исследованы экспериментально. Результаты свидетельствуют о большей эффективности заземления экрана у клемм микропроцессорной релейной защиты. Дело в том, что в условиях сложной конструкции устройств заземления оборудования релейного щита и большого количества источников электромагнитных полей обычно рекомендуемое заземление экрана с обоих концов не всегда является лучшим, так как может образовываться контур, в котором наводятся помехи от магнитных составляющих поля.

При заземлении кабеля с одной стороны уровень напряжения кондуктивных радиочастотных помех снижается до близких к предельно допустимым значениям (на 15 дБ при частотах 230 кГц и 560 кГц, что соответствует выбросам на осциллограммах электромагнитного поля).

Наиболее рациональным было бы заземление экрана в середине кабеля, однако, это сложно технически реализовать. Поэтому рекомендуется заземление экрана кабеля типа КВВГЭ со стороны микропроцессорной релейной защиты.

Представляет интерес замена кабеля КВВГЭ на считающийся более помехозащищенным кабель с витой парой и плетеным экраном. Последующее исследование показало неэффективность использования таких кабелей.

Для цепей, связывающих существующие цепи тока и напряжения релейных защит с цепями тока и напряжения устанавливаемой микропроцессорной релейной защиты, применение экранированного кабеля КВВГЭ с заземлением экрана только со стороны релейной защиты не создает достаточного запаса для гарантии защиты от возможного случайного повышения уровня напряжения помех. Поэтому для дальнейшего снижения уровня напряжения кондуктивных радиочастотных помех был выполнен эксперимент по использованию ферритового фильтра на выходе рассмотренного ранее кабеля КВВГЭ при установке на его жилах ферритового фильтра индуктивностью 250 мкГн (при частоте 1 МГц).

Сопоставление спектров измерений помех в обоих случаях (рис. 3.11) позволяет утверждать, что использование экранированного кабеля с заземлением экрана со стороны микропроцессорной релейной защиты и ферритового фильтра снижает уровень напряжения помех на 20 дБ. Такое снижение представляется достаточным для обеспечения надежности защиты цепей релейной защиты от случайных изменений напряжения помех.

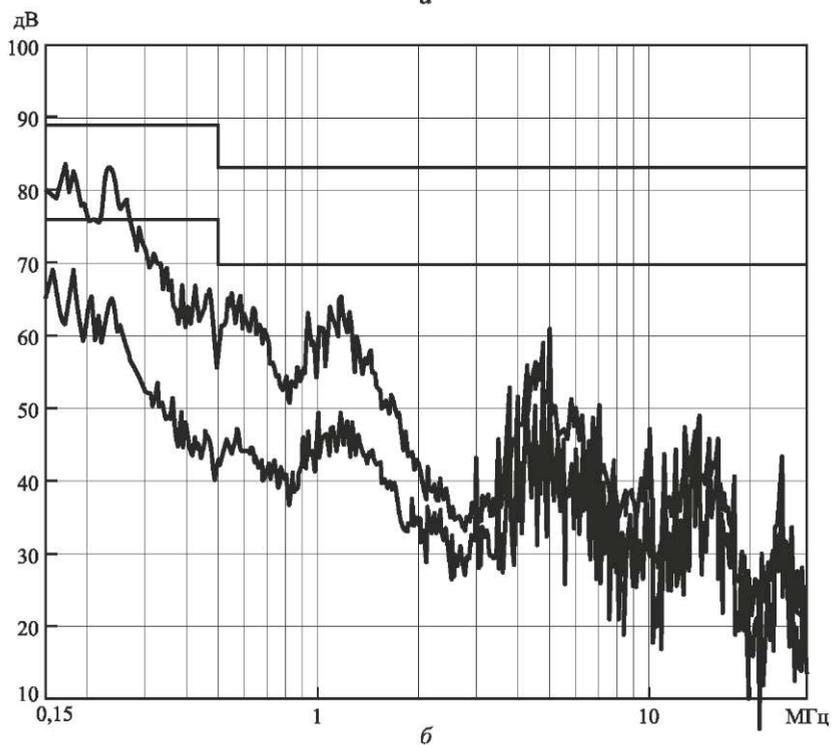
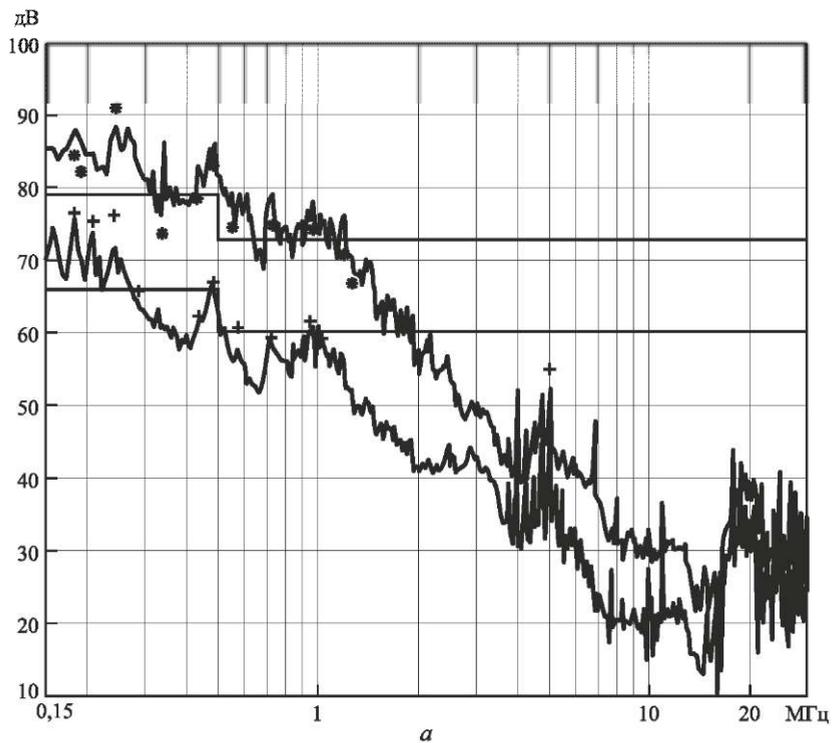
Для защиты цепи питания от кондуктивных радиочастотных помех был также исследован аналогичный ферритовый фильтр. И в этом случае снижение уровня напряжения помех очевидно (минимум на 13 дБ), что свидетельствует о перспективности предложенного средства защиты входных цепей устанавливаемой микропроцессорной релейной защиты.

Можно констатировать, что уровень напряжения кондуктивных радиочастотных помех во многих случаях превышает допустимые пределы, а в качестве средств ограничения таких помех можно рекомендовать использование кабеля типа КВВГЭ для связи существующих цепей с цепями тока и напряжения устанавливаемой микропроцессорной релейной защиты при заземлении экрана кабеля со стороны релейной защиты.

Для обеспечения запаса по ограничению уровня напряжения кондуктивных радиочастотных помех на всех входных цепях следует устанавливать ферритовые фильтры.

**Импульсные и низкочастотные помехи в цепях тока и напряжения микропроцессорной релейной защиты и в цепях оперативного постоянного тока.** Микропроцессорная релейная защита является также объектом электромагнитного воздействия со стороны внешних цепей (напряжения, тока и питания), по которым распространяются как низкочастотные колебательные паразитные сигналы, так и импульсы напряжения и тока в широком спектре амплитуд и длительностей.

Сложность экспериментального исследования этих помех заключается в самом их случайном происхождении, определяющимся такими явлениями, как коммутации высоковольтных аппаратов ОРУ под напряжением, подключения и отключения различных устройств к цепи питания в условиях нормальной эксплуатации и при выполнении



**Рис. 3.11. Спектры напряжения кондуктивных радиочастотных помех на выходе кабеля КВВГЭ:**

*а* – без фильтра; *б* – при наличии фильтра; горизонтальные линии – уровни допустимых помех

профилактических, электросварочных работ в помещении релейного щита, разрядах молнии в грозовой период и т.д.

В этих условиях наиболее эффективным методом исследования является регистрация всех аномальных электромагнитных явлений в исследуемых цепях в течение максимально длительного периода времени. Однако использование такого подхода сталкивается с техническими трудностями, связанными с отсутствием нужного количества измерительного оборудования с требующимися характеристиками.

Поэтому в данном случае использовались методы как длительного наблюдения и регистрации параметров помех в исследуемых цепях, так и непосредственного эпизодического измерения параметров электромагнитных помех в исследуемых цепях при простом наблюдении за текущим состоянием цепей и при выполнении измерений во время проведения активного эксперимента на ОРУ.

Результаты измерений электромагнитных низкочастотных и импульсных помех в цепях напряжения, тока и питания существующих релейных защит ВЛ 750 кВ, совместно с которыми будет работать устанавливаемая микропроцессорная релейная защита, показывают, что на осциллограммах отмечены как длительные «спокойные» периоды в помеховой обстановке исследуемых цепей (токи и напряжения измерительных цепей на уровне, близком к нулю и напряжение полюса «+» сети питания на уровне 110–120 В относительно земли), так и отклонения напряжения питания. Зафиксированы факты импульсных явлений в таких цепях.

Анализ зафиксированных импульсных явлений в фазах *A* и *C* цепей напряжения микропроцессорной релейной защиты позволяет констатировать, что в этих цепях наблюдаются как аperiodические импульсы микросекундного (длительностью десятки, сотни микросекунд и амплитудой от 4 до 60 В), так и миллисекундного (длительностью от 10 мс и амплитудой до 200 В) диапазонов.

Кроме аperiodических одиночных импульсов, наблюдаются и затухающие колебательные импульсы напряжения частотой 200 кГц – 1 МГц и амплитудой до 1,5 В.

Импульсные явления отмечаются и в фазе *A* цепи тока микропроцессорной релейной защиты. Зафиксированы импульсы тока микросекундного диапазона (длительностью от 1,0 до 140,0 мкс и амплитудой до 0,85 А).

В сети постоянного тока наблюдаются микропрерывания напряжения длительностью несколько сотен микросекунд и высокочастотные колебательные наводки напряжения частотой около 40 кГц и амплитудой до 11 В.

Исследуемые цепи подвергаются и электромагнитным влияниям низкой частоты. Были зарегистрированы низкочастотные наводки в виде пачек колебательных импульсов, соответствующих высшим гармоникам в сети 50 Гц, напряжением до 4,5 В.

Отмечены также наводки периодического характера с периодом около 6,5 мс и амплитудой до 10 В. Наводки этого вида совпали с временем электросварочных работ в помещении релейного щита и объясняются использованием общего контура заземления для цепей микропроцессорной релейной защиты и других цепей, включая заземление сварочного трансформатора.

Все без исключения цепи подвергаются действию электрической составляющей поля 50 Гц от оборудования сверхвысокого напряжения ОРУ, что и было зафиксировано прибором. Особенность этих наводок заключается в том, что они фиксируются только приборами с очень большим входным сопротивлением (в данном случае 1 МОм) и не проявляются в цепях тока. Так как обычно цепи микропроцессорной релейной защиты имеют входное сопротивление несколько килоом, то опасность какого-либо влияния наводок на действие этих защит практически исключается.

В период измерений сеть постоянного тока являлась единственной из исследуемых, находящейся в нормальном рабочем состоянии. Поэтому и класс зарегистрированных явлений в этой сети шире, а объем полученной информации больше:

- во-первых, наблюдаются значительные отклонения напряжения полюса «+» относительно земли (от 110 до 32 В);
- во-вторых, наблюдаются пульсации напряжения в диапазоне  $\pm 10$  В с периодом около 7,5 мс.

Отклонения напряжения объясняются ослаблением изоляции во время дождя и происходят сравнительно медленно. Это обстоятельство следует учитывать при испытаниях микропроцессорной релейной защиты.

В качестве примера регистрации событий в наблюдаемых цепях (рис. 3.12–3.14) приведены некоторые осциллограммы.

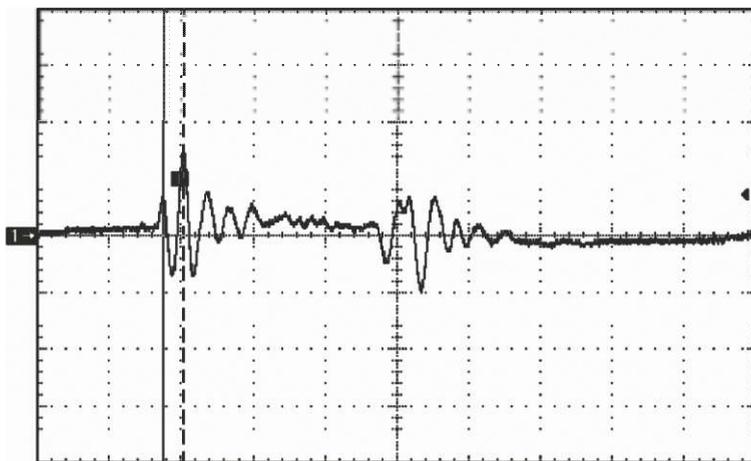


Рис. 3.12. Затухающий колебательный импульс частотой примерно 1 МГц в фазе А цепи напряжения микропроцессорной релейной защиты (масштаб времени 0,3 мкс/дел.)

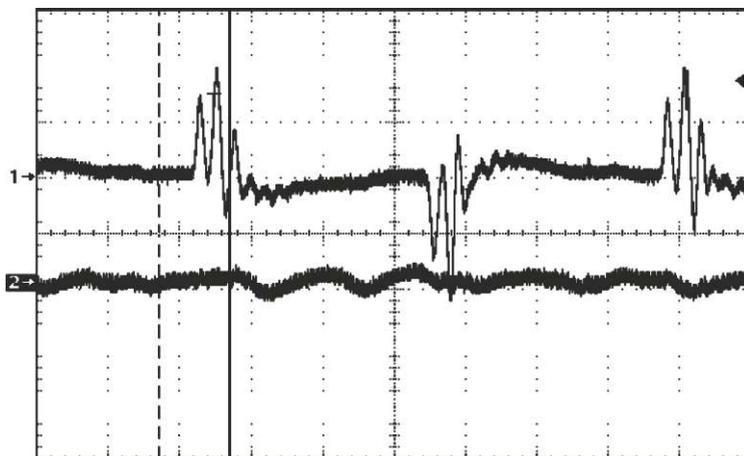
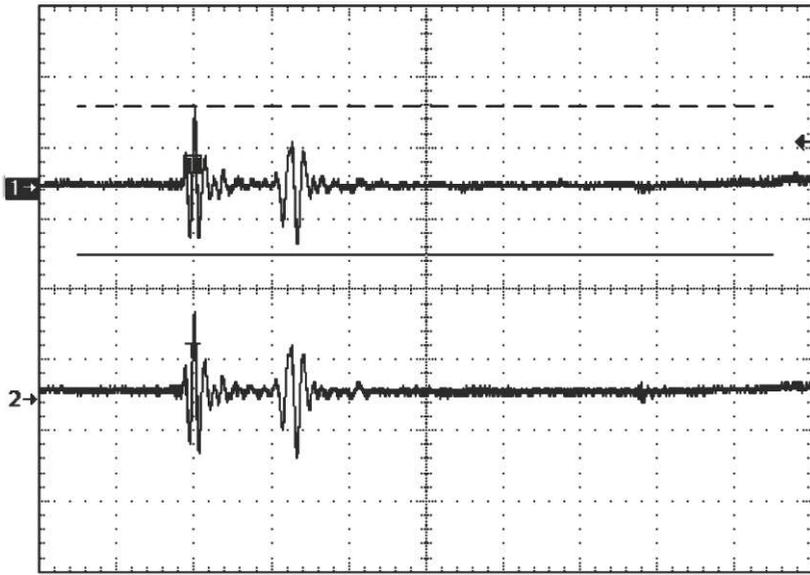


Рис. 3.13. Низкочастотные колебания напряжения в сети постоянного тока (кривая 1)



**Рис. 3.14. Затухающие колебательные импульсы напряжения, наведенные в фазах *A* (1) и *C* (2) цепи напряжения микропроцессорной релейной защиты**

Регистрация характеристик явлений в фазах *A* и *C* цепей напряжения микропроцессорной релейной защиты и в сети питания постоянного тока продолжалась около 5 мес.

Основные результаты регистрации электромагнитных событий в контролируемых цепях кратко заключаются в следующем:

- с момента установки до конца текущих суток никаких отклонений параметров режима от установленных не наблюдалось;
- измерено текущее значение напряжения полюса «+» сети питания относительно земли (94 В), которое довольно далеко от номинального (110 В), что свидетельствует об отклонении параметров сети питания от номинальных уровней;
- зарегистрированы достаточно низкий уровень напряжения полюса «+» относительно земли в сети питания микропроцессорной релейной защиты (88 вместо 110 В) и наличие возмущений в сети питания постоянного тока.

За период наблюдения отмечались как «спокойные» дни, так и дни с регистрацией импульсов напряжения в цепях напряжения микропроцессорной релейной защиты и нарушения режима в сети питания постоянного тока.

Например, в один из дней в 8 ч 13 мин напряжение полюса «+» относительно земли было 94 В и никаких нарушений установок не было зарегистрировано.

В 10 ч 17 мин напряжение полюса «+» относительно земли снизилось до 69 В, причем установка минимального уровня этого напряжения 68 В не была пройдена и никаких событий не было зарегистрировано. Колебания этого напряжения начались с 10 ч 18 мин в диапазоне 67–68 В, причем на каждом уровне напряжение держалось от 10 до 790 мс. С 10 ч 17 мин до 10 ч 19 мин зарегистрировано 854 таких явлений, т.е. примерно с периодом 0,15 с происходили колебания напряжения в пределах  $\pm 0,5$  В. Далее продолжилось снижение напряжения полюса «+» относительно земли до 44 В (до 10 ч 33 мин). К 15 ч 06 мин напряжение снизилось до 8 В, а затем поднялось до 10 В.

Одновременно в фазе *C* цепи напряжения были зафиксированы 2 импульса напряжения амплитудами 244 и 268 В и длительностью 225 и 94 мкс. К моменту времени 15 ч 57 мин напряжение полюса «+» относительно земли остановилось на уровне 124 В.

Аналогичному анализу были подвергнуты все зарегистрированные за период наблюдения распечатки событий.

В фазе *A* цепи напряжения микропроцессорной релейной защиты зарегистрировано 12 импульсов напряжения с амплитудой 304–204 В и длительностью 3 мкс и менее. Импульсные явления с параметрами того же диапазона были зарегистрированы и в другие дни периода наблюдений.

**Помехи в цепях релейной защиты при выполнении натуральных экспериментов на ОРУ АС.** Перед началом операций на ОРУ измерительные приборы на релейном щите подключены в следующие точки:

- цепь трансформатора напряжения (ТН), фаза *B* относительно земли;
- цепь ТН, фаза *A* относительно земли;
- цепь трансформатора тока (ТТ), фаза *A* относительно земли;
- цепь оперативного постоянного тока (ОТ), входы *A* и *B* («+»–земля);
- ВЧ-кабель (жила–земля);
- контрольный провод от релейного щита 750 кВ до трансформатора напряжения (жила–земля).

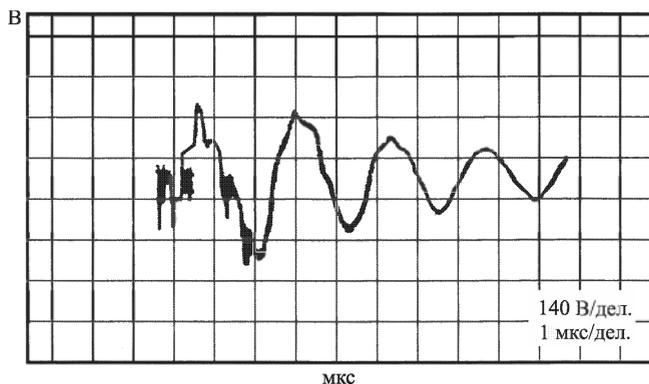
Были измерены импульсные помехи при выполнении коммутаций разъединителями одной из ячеек ОРУ 750 кВ. Результаты измерений параметров затухающих колебательных импульсных помех приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

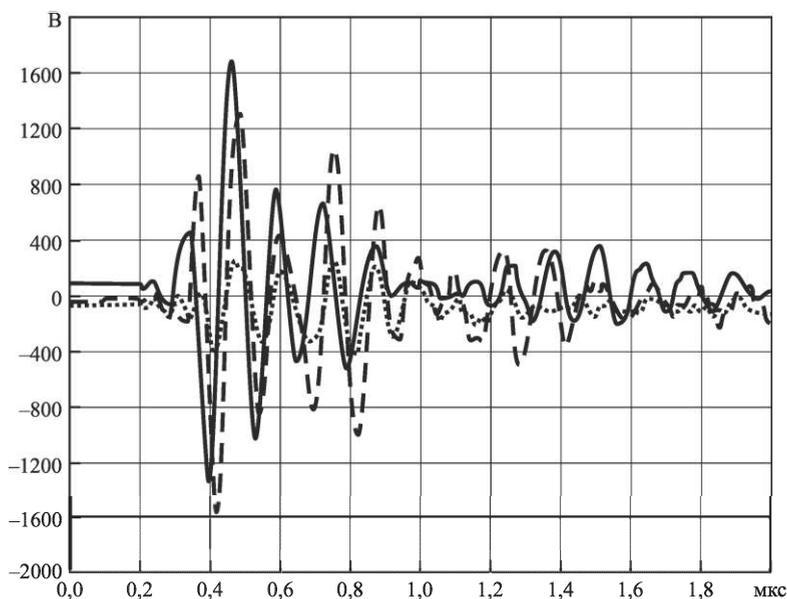
**Амплитуды и частоты затухающих колебательных импульсных помех в цепях релейной защиты и автоматики при коммутациях на ОРУ**

Место регистрации импульсов напряжения	Амплитуда, кВ	Диапазон частот, МГц
Цепи ТН, фаза <i>B</i> относительно земли	0,8–4,5	0,1–1,0
Цепи ТН, фаза <i>A</i> относительно земли	0,02–0,04	–
Цепи ТТ, фаза <i>A</i> относительно земли	<0,05	–
Цепи ОТ, «+»–земля	<0,05	0,1–1,0
ВЧ-кабель (жила–земля)	0,6–3,2	0,1–1,0

Большой объем теоретических исследований по изучению электромагнитной обстановки на подстанциях 110–400 кВ [8] показывает, что наиболее надежными являются измерения непосредственно на объекте. При измерениях помеховой обстановки на подстанции 400 кВ были определены максимальные воздействия – затухающие колебательные импульсные помехи во вторичных цепях подстанции для самого неблагоприятного взаимного расположения места измерения и типа возмущения. На рис. 3.15–3.18 показаны типичные для затухающих колебательных импульсных помех формы воздействий, а результаты исследования – в табл. 3.10. Следует отметить, что максимальная величина наводки наблюдается во вторичных цепях трансформаторов напряжения и в цепях высокочастотной аппаратуры при коммутациях разъединителем. Наблюдается значительное отличие наводок на подстанциях одного и того же класса напряжения, введенных в эксплуатацию в разное время.



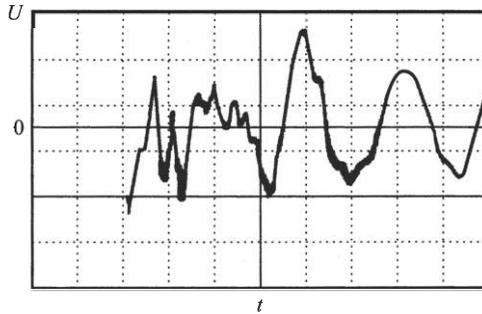
**Рис. 3.15. Типичная осциллограмма затухающих колебательных импульсных помех во вторичной цепи измерительного трансформатора на подстанции 400 кВ при коммутации разъединителем**



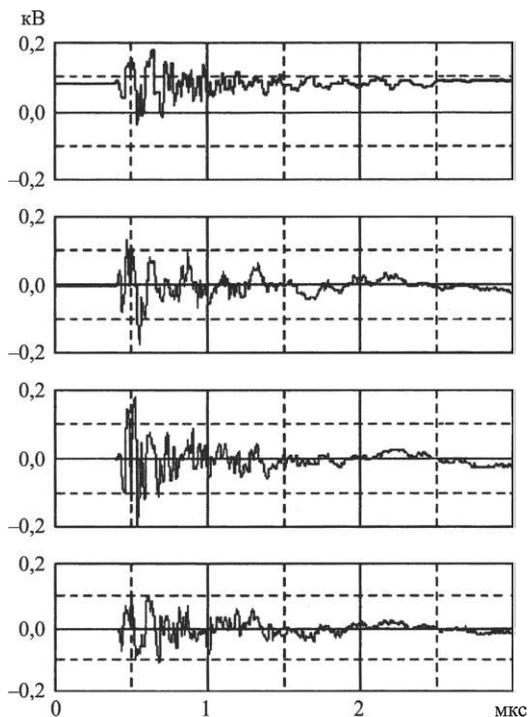
**Рис. 3.16. Типичная осциллограмма затухающих колебательных импульсных помех во вторичной цепи измерительного трансформатора на элегазовой подстанции 110 кВ при коммутации разъединителем**

На элегазовых подстанциях 110 кВ, как и на подстанциях 400 кВ, затухающие колебательные импульсные помехи наблюдаются при коммутации разъединителями. Для проведения обследований на основании модельных исследований были выбраны подстанции с одинаковыми схемами соединений, на которых выполнялись коммутации секционным разъединителем, регистрации во вторичной цепи трансформатора напряжения. Измерения проводились непосредственно в ячейках трансформаторов. При каждой коммутации выбиралось воздействие, имеющее максимальное значение; исключались результаты, на которые мог влиять эффект изменения характеристик среды. На подстанции, введенной в эксплуатацию в начале 80-х гг. XX в., было проведено

400 коммутаций, а на вновь вводимой – 100. Результаты статистической обработки серии из 400 измерений приведены на рис. 3.19. Максимальная величина затухающих колебательных импульсных помех в первом случае равна 2 кВ, во втором – 1 кВ, характерные для них частоты примерно 5–25 МГц (для подстанций 400 кВ – 0,5 МГц). Кроме того, в процессе коммутации разъединителя наблюдались перекрытия на корпус. Снижение уровня помех на вновь вводимой подстанции объясняется улучшенной конструкцией заземляющих устройств (более частой сеткой).



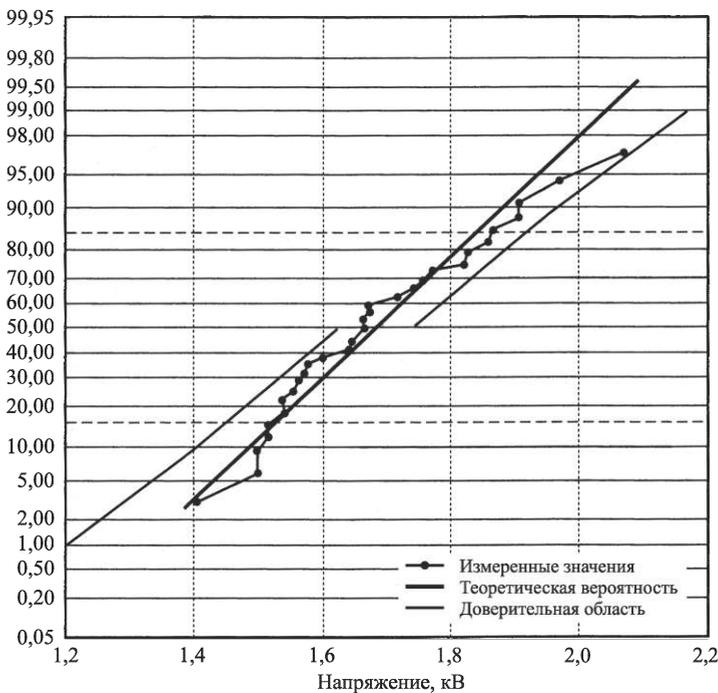
**Рис. 3.17.** Типичная осциллограмма затухающей колебательной импульсной помехи во вторичной цепи измерительного трансформатора на подстанции 400 кВ (Загреб) при коммутации разъединителем (масштаб по осям 100 В/дел.; 1 мкс/дел.)



**Рис. 3.18.** Типичные осциллограммы затухающих колебательных импульсных помех во вторичных цепях измерительного трансформатора на элегазовой подстанции 110 кВ при коммутации разъединителем с развитым контуром заземления

**Максимальное значение затухающей колебательной импульсной помехи  
во вторичных цепях на подстанциях 110–750 кВ**

Цепи низкого напряжения	Максимальная величина помех, В			
	Подстанция 400 кВ		Элегазовая подстанция 110 кВ	
	Эрнестиново	Загреб 1	1980-е гг.	2000 г.
Трансформаторы напряжения	3500	200	2000	1000
Трансформаторы тока	600	210	–	–
Цепи защиты трансформаторов	360	120	–	–
Цепи сигнализации и управления	700	–	–	–
Высокочастотные цепи	1400	100	–	–
Кабели связи	100	20	–	–



**Рис. 3.19. Результаты статистической обработки регистрации затухающих колебательных импульсных помех во вторичной цепи трансформатора напряжения при коммутации секционного разъединителя на элегазовой подстанции 110 кВ (400 событий)**

Из приведенных результатов исследований следует:

- на старых подстанциях с воздушной изоляцией коммутации разъединителем создают неприемлемый уровень затухающих колебательных импульсных помех;

- на элегазовых подстанциях нового поколения уровень затухающих колебательных импульсных помех меньше и в большинстве случаев укладывается в допустимые нормы воздействия;
- в каждом случае перед вводом нового объекта в эксплуатацию следует обеспечить проведение мониторинга уровня затухающих колебательных импульсных помех.

Приведенные в работе [14] значения затухающих колебательных импульсных помех на ОРУ 400 кВ близки к помехам, зарегистрированным на отечественных АЭС первого поколения.

Учитывая важность цепей питания оперативным током, дополним приведенные материалы кратким описанием цепей и рассмотрим подробнее проблемы электромагнитной совместимости в них.

### 3.4. Схемы цепей оперативного тока и электромагнитная совместимость

**Общие положения.** Важной составной частью АСТУ АЭС является система оперативного тока. Ее назначение заключается в обеспечении питанием устройств релейной защиты, электроавтоматики, телемеханики, связи, АСУ ТП и др. На АЭС используется оперативный постоянный ток, получаемый от свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Применение постоянного оперативного тока объясняется тем, что аккумуляторная батарея является независимым источником. Она обеспечивает своих потребителей питанием даже при полном исчезновении (потере) питания от сети переменного тока, вырабатываемого основными генераторами АЭС или получаемого от электроэнергетической системы. Полюсы «+» и «-» аккумуляторных батарей и соответствующие токоведущие части сети оперативного тока изолированы от земли и состояние изоляции автоматически непрерывно контролируется. Поэтому замыкание на землю в одной точке сети оперативного тока не приводит к появлению токов короткого замыкания или отказам в работе вторичных систем. Однако использование постоянного оперативного тока связано со следующими затруднениями в решении задач ЭМС:

- коммутация цепей постоянного тока со значительными индуктивностями вызывает перенапряжения. Уровень указанных перенапряжений выше, чем при коммутации цепей переменного тока, в силу особенности гашения электрической дуги. На переменном токе гашение дуги, как правило, происходит при переходе тока через нулевое значение. В этих условиях в индуктивностях цепи не запасена электромагнитная энергия и перенапряжения отсутствуют. На постоянном токе в электрической дуге отключения выделяется энергия, запасенная в индуктивностях цепи; процесс, как правило, сопровождается срезом тока и соответственно перенапряжениями;
- элементы защиты от перенапряжений должны гасить более значительные сопровождающие токи по сравнению с переменным током устройств сетей электропитания (который проходит через нулевое значение);
- более широкий диапазон отклонений напряжения на зажимах аккумуляторной батареи и сети, чем в сетях переменного тока. Это обусловлено различием максимально возможного напряжения (при зарядке) и минимального допустимого (при разряде).

Современное состояние атомной энергетики характеризуется переходом к электроэнергетике информатизированной, что осуществляется с помощью микроэлектронных

и микропроцессорных технических средств. Однако темпы информатизации электроэнергетики во многом зависят от электромагнитной совместимости указанных технических средств с объектами информации.

Электромагнитная обстановка в цепях оперативного тока является либо жесткой, либо крайне жесткой [2]. Это обстоятельство затрудняет внедрение устройств релейной защиты, электроавтоматики, телемеханики, управления, связи, техники АСУ и других вторичных систем, реализованных на микроэлектронной и микропроцессорной базах. В связи с отмеченным существуют две задачи, которые необходимо решить для создания требуемого уровня информатизированности электроэнергетики:

- улучшение электромагнитной обстановки на объектах информатизации, т.е. снижение уровня электромагнитных помех;
- повышение помехоустойчивости технических средств вторичных систем объектов информатизации.

Решение первой задачи связано с проведением сравнительно дорогостоящих обследований и проведением трудоемких операций по реконструкции заземляющих устройств, прокладке информационных кабелей, установке экранов, барьеров и др. Вторую задачу решают обычно путем установки устройств защиты от перенапряжений, фильтров помех и т.д. В общем случае рациональный метод решения проблемы ЭМС заключается в технически и экономически обоснованном сочетании способов решения первой и второй задач, что объясняется следующим:

- 1) устройства защиты от перенапряжений позволяют защитить входы аппаратуры, но не кабели. В ситуации, когда кабели проходят непосредственно вблизи устройств молниезащиты или электроаппаратов высокого напряжения, возможен пробой их изоляции за счет локального подъема потенциала. Проникающий при этом в защищаемые цепи импульс тока способен вывести из строя не только кабель, но и аппаратуру, поскольку защитные устройства на такую ситуацию не рассчитывают. Отметим, что часто на подстанциях заземление элементов молниезащиты осуществляется путем их установки на элементы кабельного канала или проводами длиной менее 1 м. Следовательно, по жилам кабеля могут проходить значительные импульсные токи и токи коротких замыканий, связанные с землей, что часто приводит к недопустимому перегреву изоляции кабелей;
- 2) принцип, положенный в основу конструкции большинства защитных устройств заключается в шунтировании помех в защищаемой цепи на землю. Это, очевидно, требует наличия хорошего заземления, обеспечивающего связь между всеми присоединенными к нему элементами вторичных систем. В противном случае защитные устройства малоэффективны или даже бесполезны;
- 3) конструкция энергообъектов и планировка помещений зданий АЭС, релейного щита, главного щита мало приспособлены для реализации зонной концепции защиты, подробно проанализированной в гл. 4. При обследовании электромагнитной обстановки часто обнаруживают наличие конструктивных особенностей объектов, принципиально приводящих к проникновению электромагнитных полей, токов и потенциалов помех в защищенные зоны. В частности, когда элементы цепей высокого напряжения и силовых цепей находятся на расстоянии нескольких метров от здания или даже заходят в него. Обеспечить приемлемый уровень экранирования низкочастотных полей оказывается практически невозможным. Единственный выход – такая коррекция схемы размещения аппаратуры и рабочих мест, при которой они выводятся из опасной зоны, определяемой по результатам оценки электромагнитной обстановки.

Можно назвать много других технических причин, не позволяющих отказаться от традиционных методов контроля электромагнитной обстановки. В то же время широкое применение защитных устройств позволяет уменьшить стоимость работ по обеспечению надлежащей ЭМС. Это достигается за счет минимизации доли таких дорогостоящих защитных решений, как масштабная реконструкция заземляющего устройства, изменение трасс прокладки кабелей, изменение схем грозозащиты, замена существующих кабелей на экранированные, широкое использование оптоволоконных средств и т.п.

Таким образом, комбинация широкого применения защитных устройств при зонном подходе с традиционными технологиями позволяют обеспечить надежное и экономически эффективное решение проблемы ЭМС АСУ.

**Типовые исполнения цепей оперативного тока.** Оперативный ток используется:

- для управления коммутационными аппаратами (выключателями и различными автоматическими, пусковыми и другими устройствами);
- для питания оперативных цепей релейной защиты и автоматики;
- для осуществления всех видов и способов сигнализации.

Для питания цепей оперативного постоянного тока используют свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Аккумуляторные батареи являются независимыми (автономными) источниками тока. В наиболее ответственные периоды работы объекта в течение необходимого времени (0,5–2,0 ч) ими обеспечивается действие релейной защиты, автоматики и тому подобных устройств.

Аккумуляторные батареи эксплуатируются в режиме постоянного подзаряда. В этом режиме питание постоянной нагрузки осуществляется от выпрямительных подзарядных устройств, которые включены в сеть переменного тока. При появлении значительной кратковременной нагрузки (1–2 с) аккумуляторная батарея принимает ее на себя. Такая нагрузка может быть вызвана, например, включением выключателей с электромагнитными приводами.

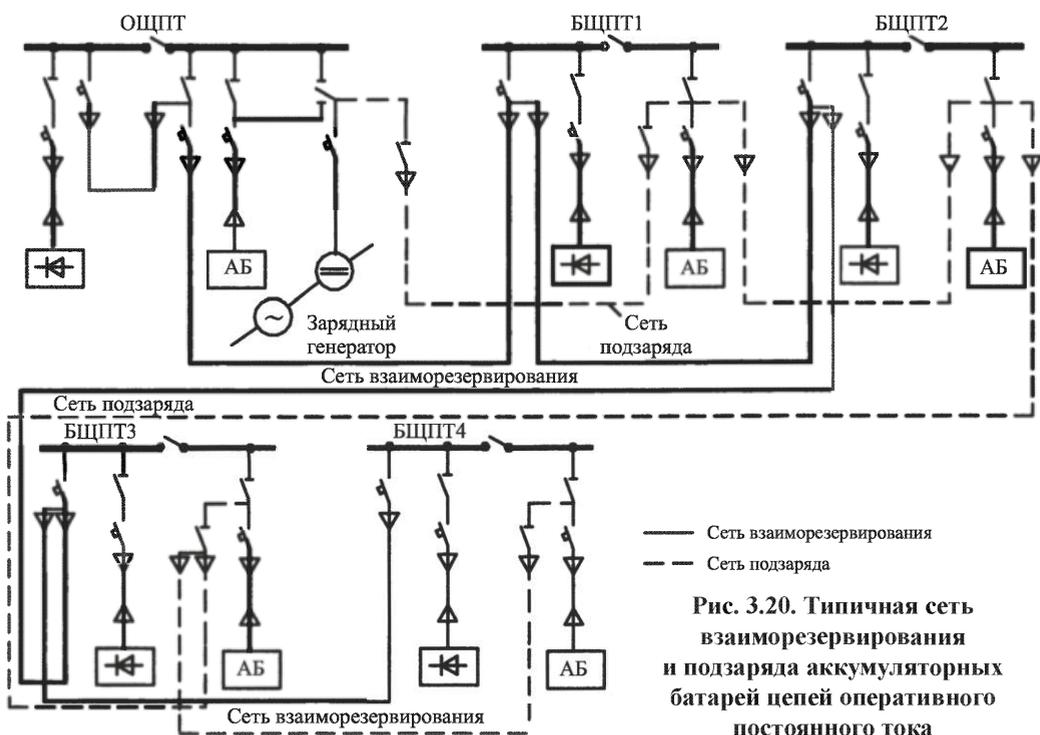
При исчезновении переменного тока батарея принимает нагрузки электроприемников постоянного тока, обеспечивая работу релейной защиты, устройств автоматики, телемеханики, связи, АСУ и возможность включения и отключения выключателей.

Наибольшее распространение на электростанциях бывшего СССР получили отечественные аккумуляторы типа СК и СН. В последнее время наблюдается тенденция замены отечественных аккумуляторных батарей на зарубежные, например фирмы Varta.

На электростанциях для получения оперативного постоянного тока используют блочные аккумуляторные батареи, питающие нагрузку, относящуюся к энергоблокам, и общестанционную питающую нагрузку общестанционного значения. Каждая аккумуляторная батарея оснащена подзарядным устройством и щитом постоянного тока, на котором кроме коммутационно-распределительной аппаратуры размещена аппаратура управления, измерения и сигнализации. Для всех аккумуляторных батарей выполняется сеть взаимного резервирования так, что на каждый щит постоянного тока может быть подано питание от батареи другого щита. На рис. 3.20 показана типичная сеть взаимного резервирования пяти аккумуляторных батарей: общестанционной (на щите ОЩПТ) и четырех блочных (на щитах БЩПТ 1–БЩПТ 4).

Для удобства эксплуатации каждый щит состоит из двух секций, к одной из которых подключена аккумуляторная батарея, а к другой (кроме ОЩПТ) – линии взаимного резерва. Обе секции нормально объединены секционным рубильником в один щит (автоматический выключатель взаимного резерва нормально отключен), но при необходимости, например на время отыскания «земли», могут быть запитаны от разных батарей.

Аккумуляторные батареи подключаются к щитам через автоматические выключатели с дугогасящей решеткой (типа АЗ700, АК62, АВ-10С).



**Рис. 3.20. Типичная сеть взаиморезервирования и подзаряда аккумуляторных батарей цепей оперативного постоянного тока**

В качестве подзарядных устройств на электростанциях используют статические преобразователи и выпрямительные агрегаты. Типичным для электростанций является зарядно-подзарядный выпрямительный агрегат типа ВЗП-380/260-40/80.

Для зарядки батарей после капитальных ремонтов или аварийных разрядов, а также осуществления периодических уравнивающих перезарядов, в помещении общестанционного щита постоянного тока установлен общий на все батареи зарядный генератор. Он при помощи силовой сети заряда (рис. 3.20) связан со всеми щитами постоянного тока, поэтому может быть подключен к любой аккумуляторной батарее. Зарядный генератор состоит из асинхронного двигателя и генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

- Помимо общестанционной и блочных аккумуляторных батарей на АЭС имеются:
- отдельные (для каждого зарядного генератора) аккумуляторные батареи для обеспечения автоматического запуска зарядных генераторов, которые, наряду с аккумуляторной батареей, являются аварийными источниками питания собственных нужд АЭС;
  - для каждого энергетического блока в главном корпусе – аккумуляторные батареи по числу систем безопасности (обычно три);
  - для аварийного питания приводов и логической части системы управления и зарядки – отдельные аккумуляторные батареи на напряжения 24, 48, 110, 220 В;
  - для потребителей ОРУ – аккумуляторные батареи в зоне размещения указанных распределительных устройств (вне главного корпуса): одна – для ОРУ 110–220 кВ; две – для ОРУ 330 кВ и выше.

**Схемы цепей оперативного постоянного тока.** От общестанционной аккумуляторной батареи через общестанционный щит постоянного тока получает питание нагрузка общестанционного назначения: центральный щит управления, электролизная, пускорезервные трансформаторы и др. Центральный щит управления также получает питание и от аккумуляторных батарей ОРУ повышенных напряжений.

От блочных аккумуляторных батарей через свои щиты постоянного тока получают питание блочные щиты управления, резервные щиты управления, КРУ 6–10 кВ, щиты машинного зала, аварийное освещение, электродвигатели постоянного тока аварийных маслонасосов турбогенераторов, щиты охлаждения турбогенераторов, автоматы гашения поля турбогенераторов, электродвигатель насоса смазки турбины, щиты турбины, парогенераторов и реактора.

Каждая аккумуляторная батарея имеет свой щит постоянного тока, который выполняют с двумя системами шин:

- силовыми шинами, к которым непосредственно подключается аккумуляторная батарея и подзарядное устройство и от которых получают питание электромагниты выключателей, двигательная нагрузка, устройства связи, аварийное освещение и др.;
- оперативными шинами, к которым присоединены цепи управления, автоматики, сигнализации и защиты.

Организация питания вторичных цепей (рис. 3.21) представлена упрощенной схемой распределения оперативного постоянного тока от щитов постоянного тока. Силовые шины 1 и 2-й секции щита постоянного тока обозначены тремя линиями (+, –, –); оперативные шины 1 и 2-й секции также состоят из трех полос (+, –, УМС).

На схеме показано и подключение к оперативным шинам центрального щита управления. Шины этого щита получают питание от двух разных секций оперативных шин щита постоянного тока. На каждой питающей линии со стороны щита постоянного тока устанавливается переключатель, позволяющий подключать линию питания к одной или другой системе оперативных шин, и предохранитель с наполнителем.

Для питания электромагнитов включения выключателей КРУ 6–10 кВ создается кольцевая схема питания с двумя питающими линиями от разных секций силовых шин щита постоянного тока и перемычками между выключателями одного распределительного устройства. На каждой питающей линии со стороны шин щита устанавливают либо автоматический выключатель, либо предохранитель. На перемычках между электромагнитами на распределительном устройстве устанавливают автоматические выключатели или секционные рубильники. Кольцо должно быть разомкнуто каким-либо автоматическим выключателем или рубильником. При повреждении какого-либо участка сети он выделяется секционными рубильниками, а неповрежденные участки получают питание от двух линий со щита постоянного тока. Все другие присоединения, по аналогии с центральным щитом управления, также имеют две линии питания от разных секций либо силовых шин, либо оперативных шин.

Итак, каждая сеть имеет две линии питания и повреждения одной из них не нарушает нормальной работы сети.

В цепях оперативного тока используется следующая коммутационная и защитная аппаратура (без учета различных реле):

- рубильники типа РП-200, РП-350, РП-600;
- переключатели типа КСФ2222/П-80;
- автоматические выключатели типа ВА, АВ-10С, А3123, А3700, АК-62;
- предохранители типа НПН2, ПН2, ПР-2.

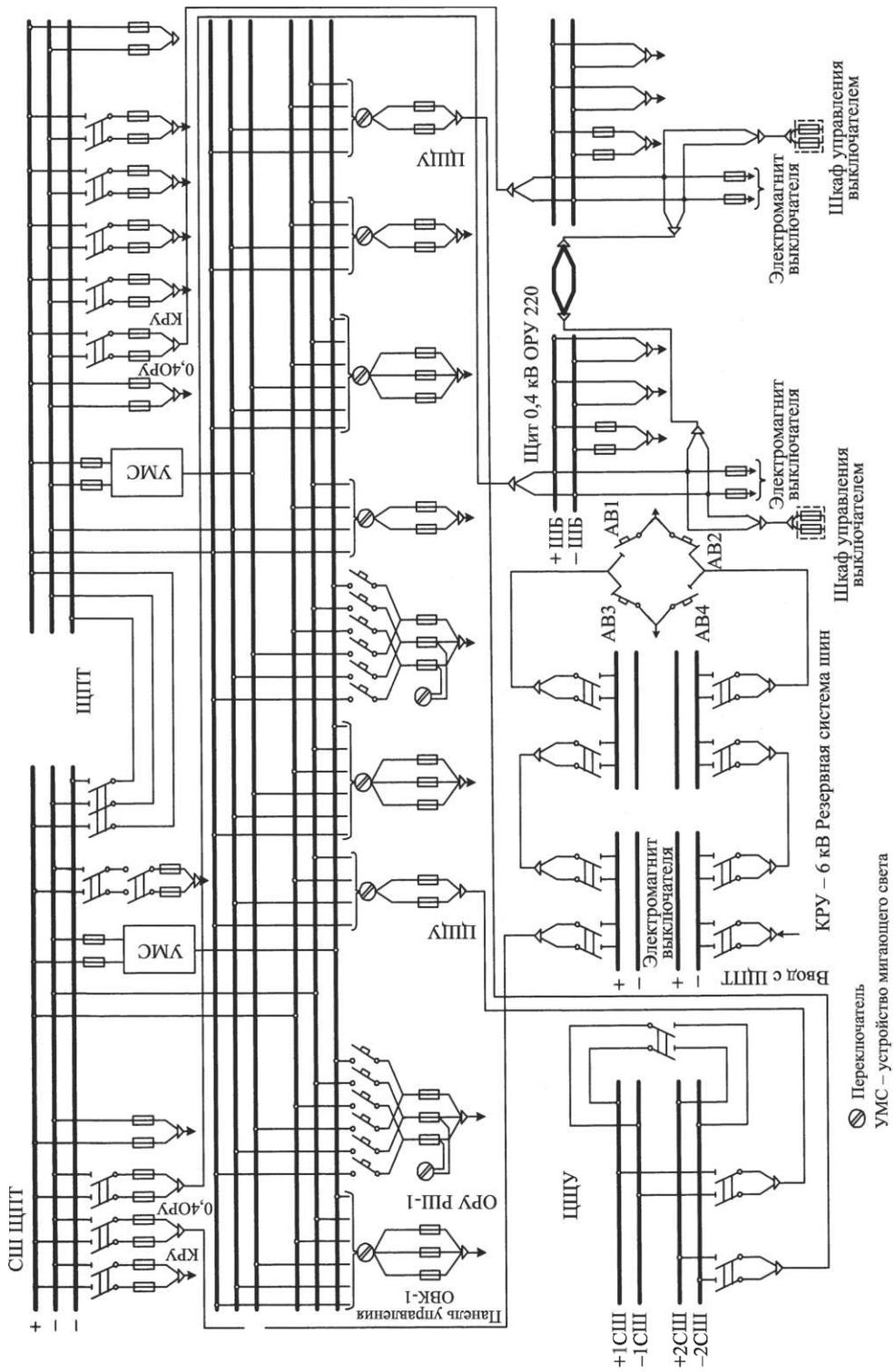


Рис. 3.21. Схема, поясняющая принципы распределения оперативного постоянного тока от щитов постоянного тока

Одной из важных проблем ЭМС в цепях оперативного постоянного тока является компоновка кабелей цепей оперативного тока. В связи с большим количеством кабелей различного назначения их часто прокладывают по совместным кабельным сооружениям (этажам, тоннелям, коробам, лоткам, каналам и т.д.).

В цепях оперативного постоянного тока АЭС применяют кабельные линии следующих типов: ААШв, АПВ, ААБПГ, АСБГ, АВВГ сечением до 120 мм<sup>2</sup>. Длины данных линий могут достигать нескольких сотен метров, что приводит к необходимости учета параметров кабельных линий при анализе высокочастотных переходных процессов.

**Потребители оперативного постоянного тока.** Их принято делить на три вида:

- *постоянная нагрузка* – аппаратура управления, защиты, сигнализации и т.п.;
- *кратковременная нагрузка* – токи электромагнитов выключателей;
- *временная (аварийная) нагрузка* – электродвигатели аварийных маслососов смазки подшипников турбин и масляных уплотнений турбогенераторов, аварийное освещение и т.д.

Одним из наиболее часто встречающихся видов электромагнитных помех являются помехи, вызванные различными коммутациями. Можно выделить две основные причины возникновения коммутационных перенапряжений и помех:

- процессы коммутации, приводящие к быстрому изменению отключаемого тока;
- наличие электроприемников с индуктивными сопротивлениями, коммутация которых приводит к освобождению запасенной в них энергии.

Значительные коммутационные электромагнитные помехи создают две группы потребителей оперативного постоянного тока:

- коммутационные аппараты (автоматические выключатели, предохранители, реле);
- электроприемники с реактивной нагрузкой (электромагниты выключателей, различные электродвигатели постоянного тока).

**Характерные виды электромагнитных помех в цепях оперативного постоянного тока и последствия их действия.** Следуя общепринятой классификации электромагнитных помех, в цепях оперативного тока можно выделить *естественные* и *искусственные* помехи. К *естественным* помехам, подлежащим учету применительно к цепям оперативного постоянного тока, относятся электромагнитный импульс грозового разряда, разности потенциалов на заземляющем устройстве. *Искусственные* помехи подразделяют на создаваемые функциональными и нефункциональными источниками.

К *функциональным* источникам помех относятся: система высокочастотной диспетчерской связи по проводам линий электропередачи, высокочастотная часть релейной защиты (дифференциально-фазной и др.), противоаварийной автоматики и высокочастотного телеотключения. *Нефункциональные* источники создают помехи в качестве побочного эффекта в процессе работы:

- аварийные разности потенциалов между различными заземляющими устройствами, а также между различными точками одного заземляющего устройства;
- провалы, прерывания и выбросы напряжения питания системы оперативного тока;
- импульсные коммутационные перенапряжения при коммутации индуктивных элементов;
- коммутационные операции оборудования высокого напряжения, например разъединителей;

- низкочастотные электрические и магнитные поля элементов главной схемы и системы собственных нужд АЭС;
- низко- и высокочастотные помехи выпрямительных и преобразовательных агрегатов систем подзаряда аккумуляторных батарей и агрегатов бесперебойного питания;
- разряды статического электричества.

Наиболее распространенными последствиями действия электромагнитных полей являются следующие:

- нарушение работы систем связи, особенно высокоскоростных цифровых каналов;
- ложные срабатывания цифровых и аналоговых электронных систем защиты и автоматики;
- частые беспричинные «зависания» и перезагрузки цифровой техники;
- повреждения блоков питания и интерфейсных элементов информационной техники и техники связи;
- выгорание или пробой изоляции кабелей;
- существенные разности потенциалов между различными заземленными элементами, а также между «землей» и нулевыми проводниками (защитным и функциональным);
- фиксация импульсов 500 В и более (при использовании регистраторов типа АИР-4);
- корреляция сбоев и отказов с грозой, работой коммутационных устройств, определенным временем суток и т.п.;
- большой трафик линий высокочастотной связи, непропорциональный объему реально передаваемой информации, частые отказы сети на физическом уровне;
- искажение изображений на экранах мониторов (дрожание, временные нарушения цветопередачи).

Для идентификации причин отказов электрооборудования, подключенного к цепям оперативного постоянного тока, могут быть использованы данные, приведенные в табл. 3.11.

По степени серьезности последствий действия электромагнитного поля на аппаратуру в действующих стандартах используют критерии качества функционирования (*A, B, C*).

Несмотря на высокий уровень формализации, применение этих критериев к рассматриваемому объекту – система оперативного постоянного тока, включающая в себя источники, приемники и сеть, требует дополнительного анализа.

Можно выделить следующие основные воздействия электромагнитного поля на систему оперативного тока.

**Аварийные и грозовые потенциалы на элементах заземляющего устройства** приводят к так называемому «обратному перекрытию», т.е. к повреждению входных питающих цепей аппаратуры и питающих кабелей за счет высокого потенциала заземленных элементов относительно положительных и отрицательных входов аппаратуры и жил кабелей. Последствия могут быть еще более тяжелыми, если сопротивления изоляции полюсов сети оперативного тока значительно отличаются от нормы. В этом случае возрастает вероятность пробоя полюса с ослабленной изоляцией.

Амплитуда данных электромагнитных помех обычно составляет 2–3 кВ, известны случаи, когда она достигала 10 кВ. Основными видами борьбы с этими помехами

являются: прокладка дополнительных заземлителей; защита цепей с помощью разделительных трансформаторов. В настоящее время эффективным способом защиты является реализация зонной концепции.

Таблица 3.11

### Идентификация причин отказов аппаратуры

Вид помехи	Вид отказа
Микросекундные импульсные помехи	Перегорание плавких предохранителей. Разрушение интерфейсных элементов (трансформаторов, оптронов, преобразователей и т.п.). Перекрытие между цепями ввода-вывода и внутренними цепями аппаратуры, приводящее к выходу из строя основных логических элементов
Наносекундные импульсные помехи	Ложное срабатывание индикаторов из-за изменения состояния соответствующих логических схем под действием помех. Перезагрузка из-за срабатывания сторожевых таймеров и других средств самоконтроля. «Зависание» аппаратуры из-за появления фатальных ошибок в программах и данных. Временный (до 3–5 мин) выход из строя схем на основе КМОП-логики. Невосстанавливаемое повреждение интегральных схем
Разряды статического электричества	Перезагрузки из-за срабатывания сторожевых таймеров и других средств самоконтроля. «Зависание» аппаратуры из-за появления фатальных ошибок в программах и данных. Временный (до 3–5 мин) выход из строя схем на основе КМОП-логики
Магнитные поля промышленной частоты	Нарушение работы электронно-лучевых дисплеев (время восстановления – до нескольких часов)
Импульсные магнитные поля	Нарушение работы электронно-лучевых дисплеев (время восстановления – до нескольких часов)

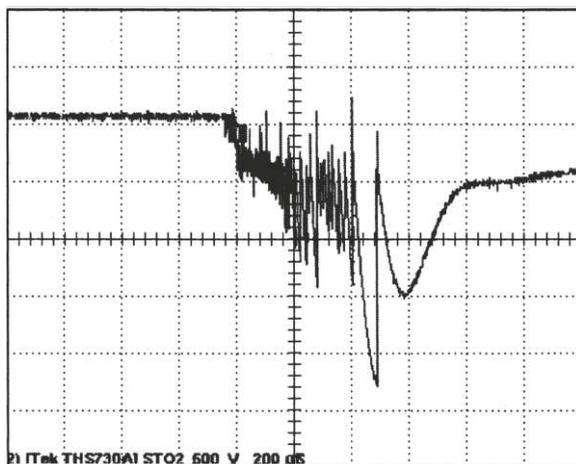
**Импульсные коммутационные перенапряжения, приложенные ко входам аппаратуры.** Они наиболее опасны по последствиям, так как приложены ко входам в виде противофазной помехи и приводят к повреждениям сетевых фильтров, в частности, конденсаторов, транзисторов, выпрямительных диодов и тиристоров.

Причиной возникновения импульсных коммутационных перенапряжений как было отмечено ранее, является коммутация индуктивных элементов системы. По продолжительности такие перенапряжения подразделяют на микросекундные большой энергии и наносекундные с малой энергией.

Микросекундные импульсные коммутационные перенапряжения в цепях оперативного постоянного тока возникают при срабатывании предохранителей и автоматических выключателей. Микросекундные перенапряжения могут содержать компоненты как в высокочастотной, так и в низкочастотной областях. Спектр частот микросекундных импульсных помех зависит не только от вида коммутационного аппарата, но и от протяженности отключаемых участков. Частота будет тем выше, чем меньше

протяженность (и, следовательно, емкость и индуктивность) коммутируемого участка. Микросекундные перенапряжения, имеющие спектр частот в высокочастотной области, представляют большую опасность по сравнению с низкочастотными микросекундными импульсными помехами.

Воздействия микросекундных импульсных помех большой энергии и наносекундных импульсных помех с малой энергией различаются проявлениями. Первые могут иметь энергию до 1 кДж и выше и могут привести к повреждению кабелей и входных фильтров. В свою очередь, наносекундные импульсные помехи с существенно меньшей энергией по сравнению с микросекундными, обычно вызываемые коммутациями электромеханическими реле (чаще всего промежуточных), могут проникать во внутренние цепи аппаратуры и вызывать сбои цифровых систем управления преобразователями, автоматов бесперебойного питания, выпрямителей и др. Микросекундные импульсные помехи чаще всего возникают при коммутации тока обмоток электромеханических реле (рис. 3.22). Такие реле являются наиболее распространенными электроприемниками в системах оперативного постоянного тока, так как они составляют основу логической части релейной защиты, автоматики, управления, сигнализации и др.



**Рис. 3.22.** Помехи при коммутации тока обмотки реле типа РП-16 (масштаб времени 1 мкс/дел.)

Наносекундные импульсные помехи могут генерироваться коллекторными электродвигателями постоянного тока (аварийные маслонасосы турбин, насосы масляных уплотнений турбогенераторов с водородным охлаждением).

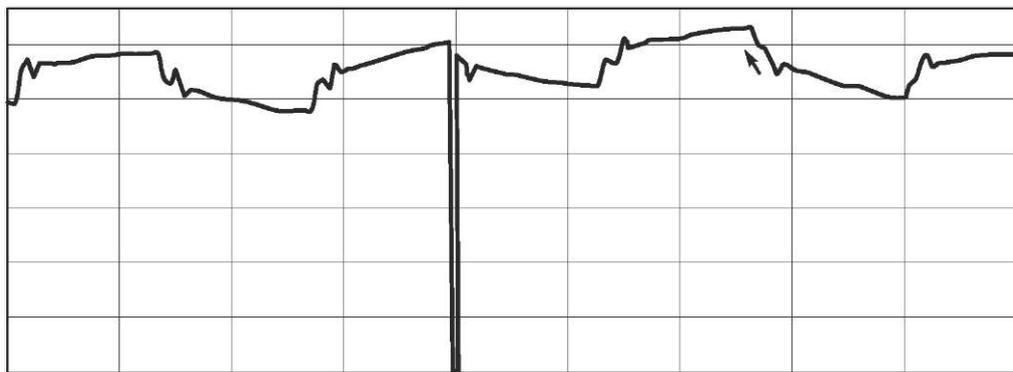
Основным методом борьбы с импульсными коммутационными помехами является установка полупроводниковых ограничителей перенапряжений на входах защищаемых цепей. Однако использование зонной концепции не обеспечивает эффективной защиты от таких помех, приложенных ко входам аппаратуры по схеме «провод–провод». Необходимо также учитывать, что аппаратура с полупроводниковыми элементами потенциально более устойчива при перенапряжениях «провод–земля», чем при приложении последних по схеме «провод–провод».

**Ухудшение качества напряжения питания сети оперативного тока (провалы, прерывания и выбросы напряжения).** Основной причиной провалов и прерываний напряжения питания являются короткие замыкания, резкие колебания нагрузки

и нелинейные элементы в сетях электропитания. Длительность провала или прерывания определяется временем отключения короткого замыкания (временем срабатывания предохранителя или полным временем отключения автоматического выключателя). В зависимости от удаленности точки короткого замыкания от источника питания возникают провалы или прерывания напряжения. В нормальных условиях выбросы напряжения в сети исключаются, так как источниками питания являются аккумуляторные батареи. Выбросы (повышения напряжения в сети) могут возникать в сравнительно редких случаях из-за неисправности цепи возбуждения зарядного генератора в режиме зарядки батареи. Максимум напряжения в сети при этом может достичь значения 400 В.

Провалы и прерывания напряжения могут привести к сбоям в работе вторичных систем, а выбросы – к повреждению блоков питания.

На рис. 3.23 показана осциллограмма колебаний и микропрерывания напряжения питания постоянного тока.



**Рис. 3.23. Колебания и микропрерывание напряжения питания постоянного тока (масштаб времени 6,6 мс/дел.)**

В цепях питания постоянного тока АЭС наблюдаются отклонения напряжения в диапазоне от  $-12$  до  $+30$  В, незначительные колебания напряжения  $\pm 5$  В, микропрерывания напряжения до нуля длительностью (200–400) мкс и наведенное напряжение амплитудой 125 В частотой 50 Гц.

**Помехи от грозовых разрядов.** По рекомендациям МЭК импульс, имитирующий грозовую помеху соответствует  $1,2/50$  мкс ( $1/50$  мкс).

При малом сопротивлении элемента, на который действует этот импульс, энергия, выделяемая на элементе, достаточно велика. Грозовой импульс может создать наводки в кабелях и привести к повреждению входных элементов источников питания аппаратуры, т.е. по действию грозовой импульс эквивалентен микросекундным импульсным коммутационным помехам с большой энергией. Помехи от грозовых разрядов, наведенные в жилах кабелей оперативного тока, могут проникать в блоки питания и аппаратуру и вызвать их сбой, особенно при микропроцессорном управлении.

Амплитудно-частотные характеристики импульсных помех, возникающих в кабелях оперативного постоянного тока, изменяются в широком диапазоне и зависят от параметров тока молнии, трассы и длины кабелей, нагрузки на концах кабелей. Частотный спектр изменяется от десятков килогерц до нескольких мегагерц. Амплитуда импульсных помех может составлять десятки киловольт, т.е. существенно выше регламентированных нормами.

Основными методами борьбы с данными помехами являются улучшение заземления элементов молниезащиты, экранирование кабелей и аппаратуры, установка разрядников, варисторов, специальных сетевых фильтров.

**Помехи при операциях с разъединителями и выключателями на распределительных устройствах.** Возникновение их объясняется многократными пробоями между контактами разъединителей за счет свободных колебательных процессов на относительно коротких участках ошиновки. Частотный спектр колебательного процесса находится в диапазоне от единиц до десятков мегагерц. Продолжительность процесса может достигать нескольких секунд и часто имеет вид серии импульсов – до нескольких тысяч за одну коммутацию.

Коммутации выключателей приводят, как и в случае с разъединителями, к помехам в цепях оперативного постоянного тока в виде колебательных затухающих импульсов различной частоты и продолжительности (рис. 3.24).

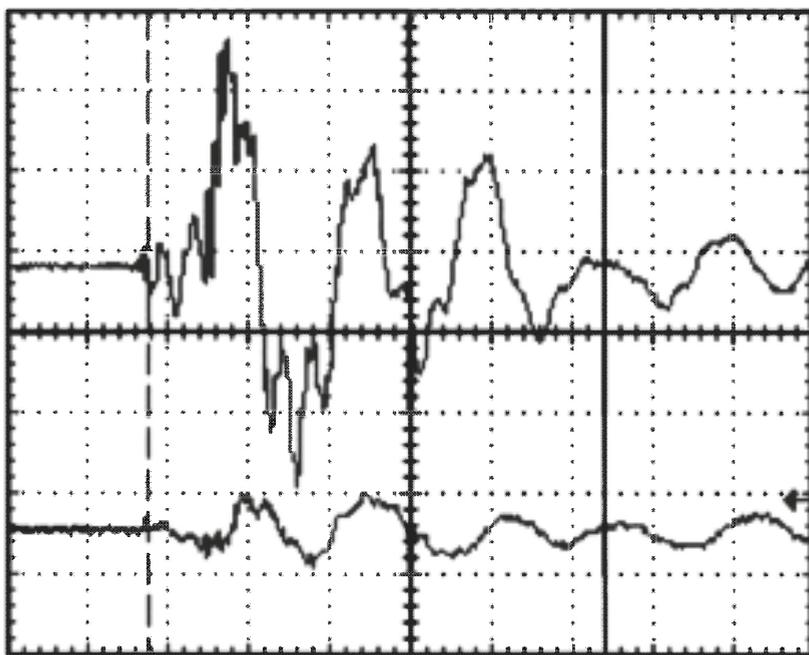


Рис. 3.24. Импульсные помехи в цепях оперативного постоянного тока, вызванные отключением выключателя 220 кВ (масштаб времени 2 мкс/дел.)

**Низкочастотные электрические и магнитные поля токов короткого замыкания** существуют кратковременно, что определяется временем срабатывания релейной защиты и временем отключения выключателей. Конструкция кабелей системы оперативного тока обеспечивает малость ЭДС наводок. Амплитуда данных помех определяется состоянием контуров заземляющих устройств и существенно уменьшается при использовании зонной концепции защиты.

**Низкочастотные и высокочастотные помехи выпрямительных и преобразовательных агрегатов.** При исправных входных и выходных фильтрах выпрямителей и преобразователей обеспечивается допустимый уровень пульсаций и соответственно помех. Неисправные выпрямители и преобразователи являются источниками

нечетных гармоник, кратных частоте преобразования. Высшие гармонические помехи могут привести к сбоям систем управления блоков питания аппаратуры. Защита аппаратуры от указанных помех осуществляется путем установки *LC*-фильтров.

**Разряды статического электричества** для системы оперативного постоянного тока опасности не представляют из-за малости энергии, выделяемой при разряде.

**Радиочастотные помехи.** Данные измерений кондуктивных радиочастотных помех показывают, что их уровень в сетях постоянного тока АЭС превышает установленные стандартами РФ пределы (см. рис. 3.11), что может приводить к сбоям работы цифровой аппаратуры. Эти сбои связаны с неудовлетворительными экранирующими свойствами ее корпуса или неправильной схемой заземления аппаратуры и экранов кабелей.

На основании изложенного обзора возможных электромагнитных помех в цепях оперативного постоянного тока можно сделать вывод, что наиболее опасными являются помехи, вызванные импульсными коммутационными перенапряжениями (грозовыми разрядами и аварийными потенциалами заземляющих устройств) из-за коротких замыканий и грозовых разрядов. Аварийные потенциалы на элементах заземляющих устройств и помехи от грозовых разрядов в основном определяются состоянием заземляющих устройств. Поэтому помехи, вызванные внешними перенапряжениями – грозовыми разрядами и аварийными потенциалами заземляющих устройств, могут быть существенно подавлены путем реализации зонной концепции защищены. Однако внутренние перенапряжения – импульсные коммутационные перенапряжения не могут быть уменьшены с помощью реализации зонной концепции. Поэтому при анализе систем защиты цепей оперативного постоянного тока от электромагнитных помех основное внимание должно быть уделено использованию элементов, ограничивающих помехи.

Существуют два подхода к определению параметров импульсных коммутационных помех:

- экспериментальный (статистический), реализующийся с помощью непосредственных измерений на существующих объектах;
- теоретический (расчетный), в котором применяют математическое и (или) физическое моделирование процессов, происходящих в исследуемых электроэнергетических системах при импульсных коммутационных помехах.

Каждый из этих подходов имеет свои недостатки. Статистический подход к определению параметров помех с использованием математического аппарата теории вероятностей требует большого количества измерений в течение длительного времени из-за того, что возникновение недопустимых помех – редкое явление и носит случайный характер. Кроме того, для применения традиционных средств измерения (осциллографы, импульсные вольтметры и др.) необходим ряд дополнительных устройств: входных делителей, фильтров, схем запуска и управления, схем сопряжения с ЭВМ, защиты от импульсных помех в их цепях питания. В результате получается достаточно сложная информационно-измерительная система, эксплуатация которой вне лабораторных условий затруднена. Это приводит к необходимости создания дорогостоящих специализированных устройств для исследования импульсных коммутационных помех. Применение статистического подхода в качестве единственного для определения параметров помех сомнительно еще из-за того, что не исключена возможность неучета или нефиксирования маловероятного, но возможного, максимального импульса коммутационных перенапряжений.

Учитывая высокое ответственное назначение цепей оперативного тока АЭС, более целесообразно ориентироваться на наихудший случай – максимально возможные параметры импульсных коммутационных помех. В связи с этим в настоящее время получили распространение расчетные методы определения параметров помех, реализованные с использованием различных программ схемотехнического моделирования (Micro-Cap, DesignLab, OrCad, PSpice, ALPAC и др.). Для точного определения параметров помех необходимо учесть большое количество факторов, не все из которых возможно учесть без соответствующих измерений на исследуемых объектах или на их физических моделях, т.е. создание точных расчетных методов невозможно без исходных данных, полученных экспериментально. Однако расчетные модели, несмотря на большую трудность их получения, более универсальны и после небольшой адаптации возможно их применение на различных объектах. Как известно, основной причиной возникновения импульсных коммутационных помех являются процессы коммутации, приводящие к быстрому изменению отключаемого тока и соответственно к быстрому перераспределению и преобразованию энергии. Поэтому при расчетном подходе к определению параметров помех определяющими являются модели аппаратов, производящих коммутацию (автоматические выключатели и предохранители).

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Чем характеризуется электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики?
2. Каковы критерии качества функционирования устройств?
3. Какими параметрами характеризуются помехи, их уровень?
4. Охарактеризуйте классы окружающей среды, степени жесткости испытаний и группы исполнения ТС по условиям электромагнитной совместимости и установите между ними связь.
5. Чем отличаются жесткая и крайне жесткая электромагнитная обстановка?
6. Назовите базовые публикации по нормам испытаний на ЭМС.
7. Назовите основные виды электромагнитных помех и стандарты по испытаниям на помехоустойчивость.
8. Каков состав портов ТС, подлежащих испытаниям на воздействие помех?
9. Как воспроизводятся напряжения и токи помех при испытаниях ТС?
10. В чем различие нормированных и реальных помех на объектах энергетики?
11. Что такое коэффициенты запаса по устойчивости ТС к электромагнитным воздействиям?
12. Почему в основе определения ЭМО закладывают расчетно-экспериментальные методы ее параметров определения?
13. Каким образом от группы исполнения ТС зависит нормированное воздействие при испытаниях?
14. Какой комплекс работ необходимо выполнить при обследовании ЭМО в ОРУ высокого и сверхвысокого напряжений?
15. При каких условиях МПУ РЗА релейного щита может испытывать воздействие магнитного поля напряженностью более 400 А/м?
16. Являются ли обязательными измерения параметров радиочастотных полей при обследовании ЭМО на объектах электроэнергетики?
17. Обладают ли хорошими экранирующими свойствами при радиочастотном излучении здания релейного щита ОРУ?
18. Как согласно стандартам МЭК и РФ измеряются радиочастотные помехи на выходе кабелей МПУ РЗА?
19. В каких вторичных цепях наблюдаются наибольшие помехи при коммутации шинным разъединителем ВН?
20. Каковы характерные источники и виды помех в цепях оперативного постоянного тока и опасность помех?

## ГЛАВА 4

# ЗОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ПОМЕХ

### 4.1. Основные положения зонной концепции

В 70-е годы XX в. была разработана зонная концепция защиты зданий, оснащенных электроникой, от электромагнитного воздействия атмосферных разрядов, ядерных взрывов и коммутаций в энергетических сетях, сопровождающихся выделением больших энергий. В дальнейшем зонная концепция нашла широкое применение при обеспечении электромагнитной совместимости [26]. По ней выделяют определенные зоны с характерными для них электромагнитными условиями (рис. 4.1).

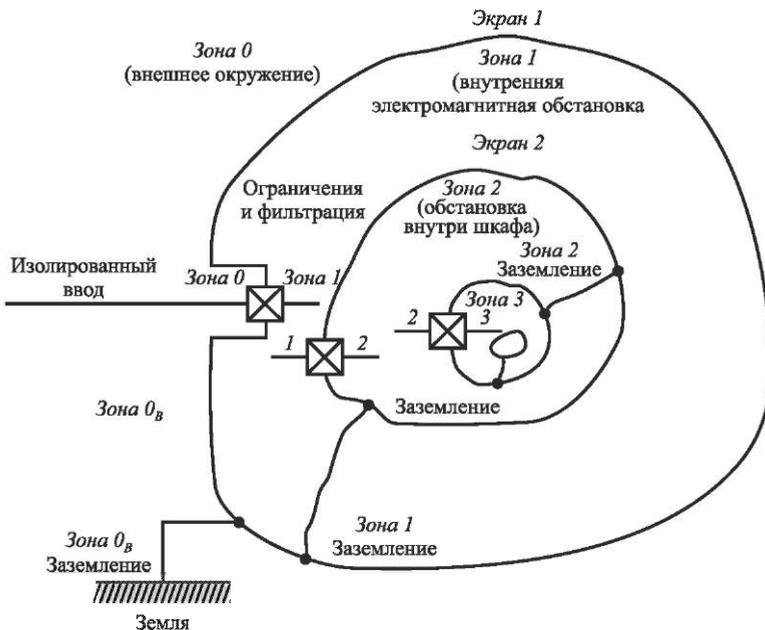


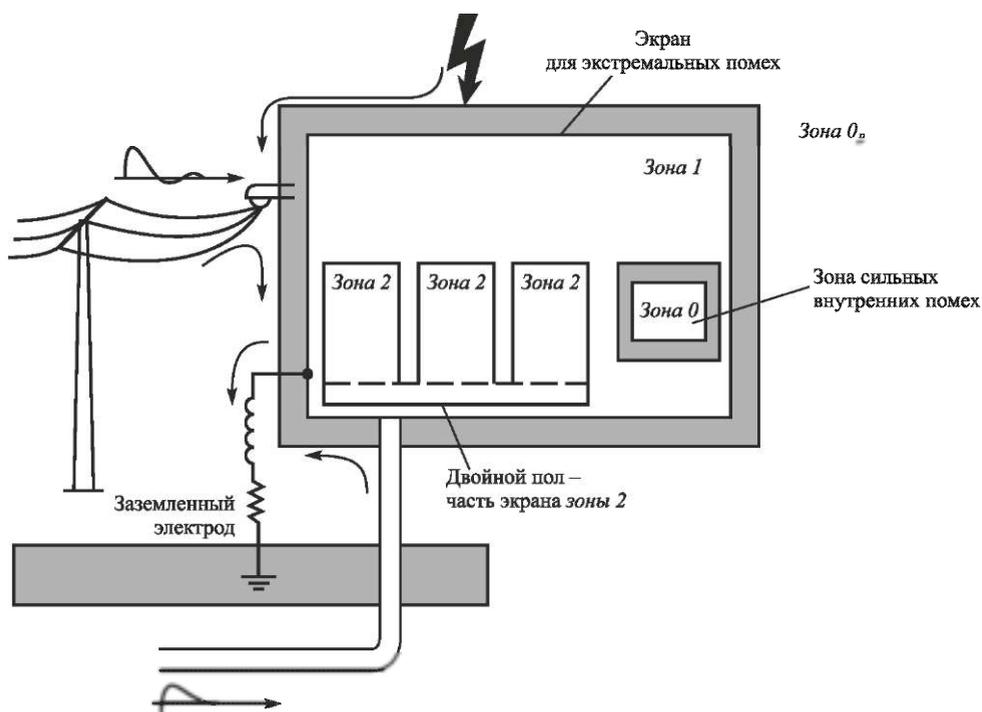
Рис. 4.1. Экранирование и заземление в зонах комплексного устройства

Зона 0 характеризуется оригинальными электромагнитными недемпфированными помехами. В зоне 1, окруженной электромагнитным экраном, помехи ослаблены. Экран 1 может, например, представлять собой каркас здания. В зоне 2, ограниченной

экраном 2, содержащей, например, чувствительное электронное оборудование, помехи еще больше ослаблены, а в зоне 3, например, внутри прибора, где находится особо чувствительная электроника, помехи ограничены до безопасных значений.

Все металлические провода электропитания, пересекающие границы зон, должны быть снабжены элементами, снижающими помехи и перенапряжения (см. рис. 4.1). Указанные меры направлены на то, чтобы ступенчато, от зоны к зоне внутри системы снизить помехи и перенапряжения.

Частично экраны принимают на себя кондуктивные помехи, поступающие по проводам питания (рис. 4.2). Ясно, что внутренние источники помех в пределах экрана не устраняются. Источниками таких (полевых или кондуктивных) помех являются, например, электротехнические устройства, в которых имеет место регулярная работа – коммутации реле, выключателей, тиристоров или аварийные режимы (отключение защитных выключателей или предохранителей).



**Рис. 4.2. Использование экранов для нейтрализации экстремально интенсивных источников внешних и внутренних помех**

В принципе две пространственно разделенных зоны 1 с помощью экранированного соединения могут образовать общую зону (рис. 4.3).

Описанная зонная концепция в немецких нормах защиты приборов (нормы VG) используется как генеральная методика защиты систем и приборов от электромагнитного воздействия атмосферных разрядов и ядерных взрывов (рис. 4.4). Здесь также выделены защитные зоны. В зоне  $0_A$  могут быть самые жесткие электромагнитные условия. Защитный объем зоны 1 окружен экраном. В защитной зоне 2 электромагнитные помехи ослаблены. Все металлические элементы электроснабжения, проходящие через экраны на границах зон, раздельно присоединены к экранам. Кроме того, приборы

в защитной зоне должны быть защищены, причем для них должны также соблюдаться условия такие же, как и на границах зон.

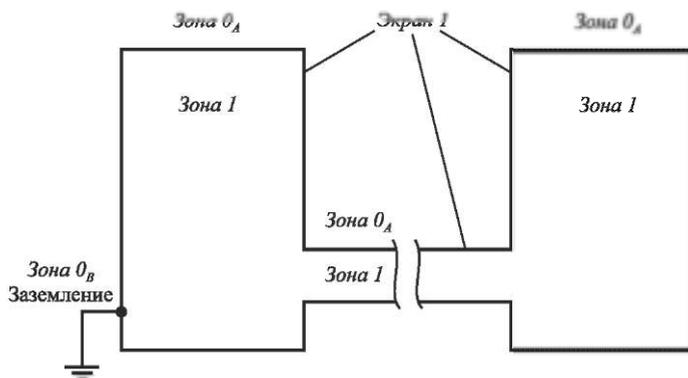


Рис. 4.3. Объединение двух зон

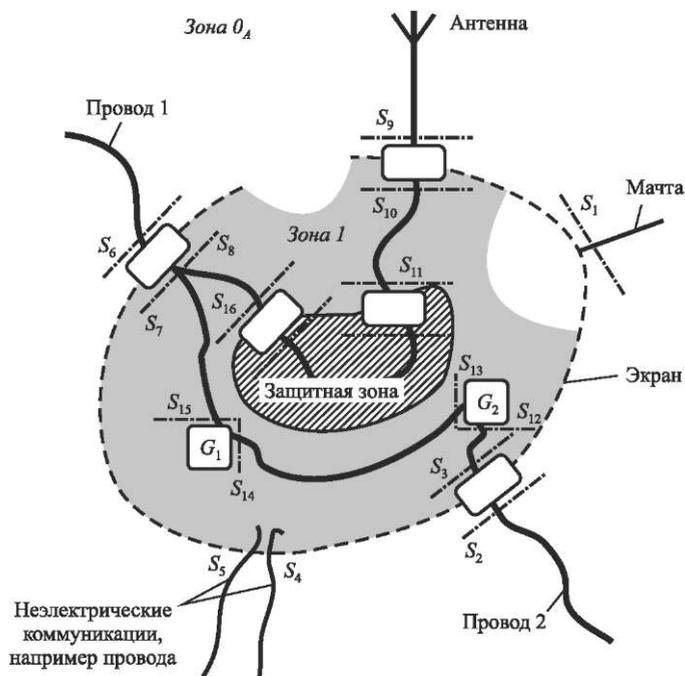


Рис. 4.4. Деление системы на зоны с границами зон

Исходя из указанного принципа авторы работы [26] считают, что в принципе зонная концепция молниезащиты позволяет защитить любые технические устройства, в том числе чувствительные электронные системы, от электромагнитных воздействий, в частности, от прямых ударов молнии в устройства. Рассматриваемые далее способы применения зонной концепции не имеют ограничений и могут применяться на электростанциях, в крупных вычислительных центрах, на химических заводах, в телефонных сетях и устройствах и т.д. Это достигается тем, что молниезащита строительных

сооружений и их оснащение выполняют также в соответствии с зонной концепцией. При этом необходимо отметить следующее:

- зонная концепция молниезащиты исходит из того, что первичная металлическая конструкция строительного сооружения используется или может быть использована в качестве экрана. Подобная экранная структура образуется, например, стальной арматурой крыши, стен, полов здания, а также металлическими деталями крыши, фасадов, стальными каркасами, решетками. Эта экранирующая структура образует электромагнитный экран с отверстиями (за счет окон, дверей, вентиляционных отверстий, шага сетки в арматуре, щелей в металлическом фасаде, отверстий для линий электроснабжения и т.п.). Такой экран с системообусловленными отверстиями будем в дальнейшем называть *экраном с отверстиями*;
- экранная структура должна быть расположена рядом с молниеприемниками, спусками, заземляющими проводами и работать непосредственно с ними;
- в крупных технических сооружениях практически невозможно проконтролировать прокладку всех проводов, в различных местах помещения могут появиться неучтенные соединения между приборами и системами. Поэтому первоначально созданная пространственная звездная концепция выравнивания потенциалов преобразуется в смешанную систему выравнивания потенциалов.

Авторы работы [26] стремятся превратить зонную философию в законченную концепцию, чтобы ответить на все вопросы, связанные с техникой молниезащиты, т.е. сформулировать требования, связанные с растеканием тока молнии и с электромагнитным полем тока молнии.

К проблемам молниезащиты принадлежат также ориентация канала молнии, отвод тока по объекту и отвод тока в землю (главная задача классической молниезащиты), выравнивание разности потенциалов, и, естественно, определение пространственных областей, в которых электромагнитные условия, обуславливающие кондуктивные и полевые помехи, не опасны для электронного оборудования. Зонная концепция должна интегрировать все сегодняшние достижения в области электромагнитной совместимости, облегчать выполнение требований стандартов, в частности, при выравнивании потенциалов и обустройства заземлений.

Первым требованием является то, что наряду с *зоной  $\theta$* , где возможны прямые удары молнии, и в которой существуют специфические электромагнитные поля, следует выделить *зону  $\theta_B$* , в которой существует оригинальное электромагнитное поле, но в пределах которой невозможны прямые удары.

Первичный защитный объем промышленного сооружения ограничен *зоной  $\theta$* , причем между *зонами  $\theta_A$*  или  $\theta_B$  и  $I$  располагается более или менее сплошной экран (с отверстиями).

В технике молниезащиты принято экран располагать полностью или частично между *зонами  $\theta_A$*  или  $\theta_B$  и  $I$ , между молниеприемником, спуском и проводом, идущим к заземлению. В этом случае по электромагнитному экрану с отверстиями частично или полностью протекают переходные токи, обусловленные молнией.

Зонная концепция молниезащиты ориентируется на предельные электромагнитные источники помех, а именно, на прямой удар молнии в защищаемое здание с электронным оборудованием, и поэтому предусматривает всеобъемлющие мероприятия по защите. Одновременно при выполнении требований по защите при ударе молнии обеспечивается защита от ядерного электромагнитного импульса.

**Основы зонной концепции молниезащиты.** Задача молниезащиты, сориентировать удар в молниеприемник, отвести ток по спуску к заземлителю и там распределить по земле. В защищаемом объеме должны быть снижены до безопасных значений падения напряжения на активном, емкостном и индуктивном сопротивлениях. Защищаемый объем – это, прежде всего *зона 1*, на периферии которой имеется экран с более или менее выраженными отверстиями.

Молниеприемник, спуск и заземлитель могут быть:

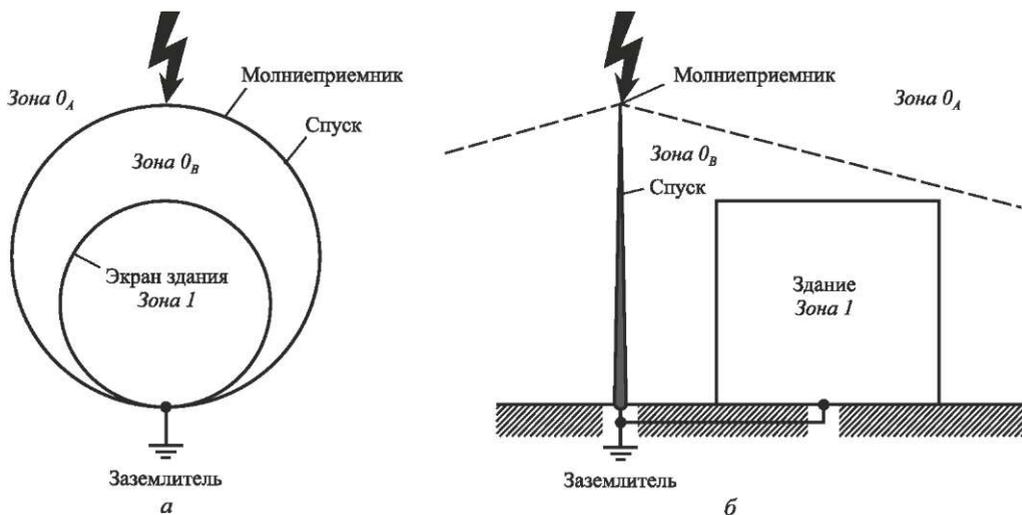
- изолированными;
- частично изолированными;
- совмещенными со зданием.

Для разработки конкретной зонной концепции здания сначала следует определить класс защиты согласно нормам МЭК-61024-1.

При классе защиты I молниеприемник и спуск имеют эффективность 99 % (т.е. только каждый сотый удар приходится мимо них). При классе II эффективность составляет 98 %, а при классе III – 97 %. Класс IV для зданий не принимается во внимание. Для зданий, оснащенных электронным оборудованием, как правило, достаточно выбрать класс I.

В работе [27] изложен метод выбора молниеприемника с помощью «шара». При этом определенному классу защиты соответствует определенный радиус «шара»: I класс –  $r = 20$  м; II класс –  $r = 30$  м; III класс –  $r = 45$  м; IV класс –  $r = 60$  м.

В дальнейшем рассмотрим три характерные устройства молниеприемников, спусков и заземлителей. На рис. 4.5 схематично показана конфигурация зоны защищенного объема изолированного молниезащитного устройства по нормам МЭК.



**Рис. 4.5. Зоны при изолированном молниезащитном устройстве:**

*а* – схема; *б* – пример

Защищаемый объем (*зона 1*) задается электромагнитным пространственным экраном (с отверстиями). В защитной *зоне 0\_A* возможны удары молнии и существует электромагнитное поле, обусловленное током молнии. Выбранный в соответствии с классом защиты молниеприемник принимает удары молнии и отводит ее ток в спуск (заземлитель).

Молниеприемник и проводник к заземлителю отделены от зоны 1. На уровне земли проводник и пространственный экран зоны 1 соединяются между собой с заземлителем.

Изолированными молниеприемниками и спусками между зонами  $\theta_A$  и 1 создается зона  $\theta_B$ , в которой невозможны прямые удары молнии, однако образуется оригинальное электромагнитное поле. В этом случае через пространственный экран зоны 1 ток молнии не протекает.

Частично изолированная молниезащитная система показана на рис. 4.6. Здесь также имеется зона 1, окруженная электромагнитным экраном. Однако только молниеприемник пространственно отделен от зоны 1, причем также образуется зона  $\theta_B$  между молниеприемником и защитной зоной 1.

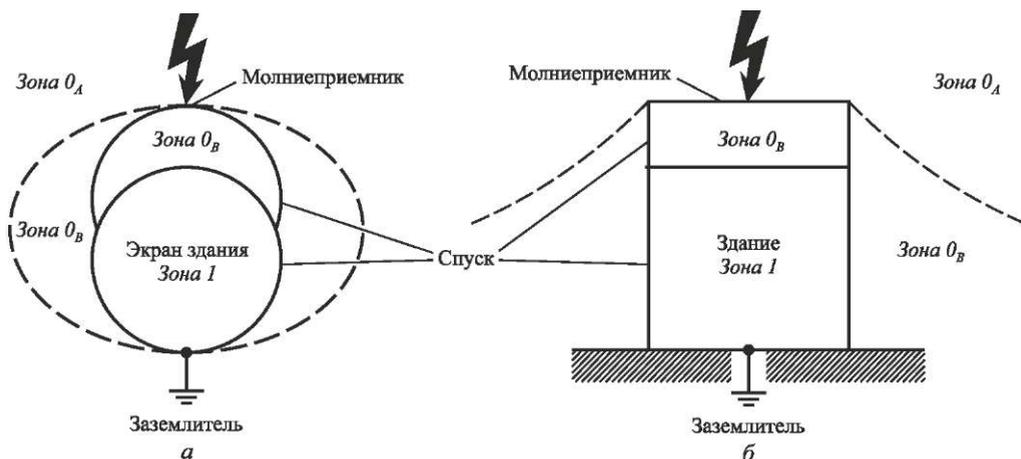


Рис. 4.6. Зоны при частично изолированном молниезащитном устройстве:  
а – схема; б – пример

Электромагнитный экран зоны 1 берет на себя функции спуска, т.е. по нему течет часть тока молнии в землю.

Наконец, на рис. 4.7 показано совмещенное со зданием заземляющее устройство. Здесь электромагнитный экран зоны 1 воспринимает на себя функции как молниеприемника, так и спуска. Ток полностью протекает по экрану зоны 1 в землю. Экран является частью заземляющего устройства.

В районе молниеприемника зона  $\theta$  непосредственно смыкается с зоной 1, а вблизи точки удара зона 1 переходит в зону  $\theta_B$ .

Какой из трех вариантов будет реализован, зависит от постановки задачи и типа защищаемого здания. В зависимости от устанавливаемых радиотехнических приборов, систем и требований к их молниезащите, может возникнуть необходимость общий защищаемый объем разделить на зоны (рис. 4.8).

Каждая защитная зона может быть дополнена электромагнитным пространственным экраном, системой экранов или приборным экраном. Этой дополнительной защитой с учетом экономических затрат можно достичь желаемого снижения электромагнитных помех, а также создать защитную зону, в которой располагаются наиболее чувствительные приборы или система. Далее установкой разрядников на границах зон можно повысить надежность защиты.

Наряду с зонами защиты, расположенными в традиционном порядке (зоны 1–3 на рис. 4.8), можно создать локальные защитные зоны 1а, 1б и 2а для приборов и систем.

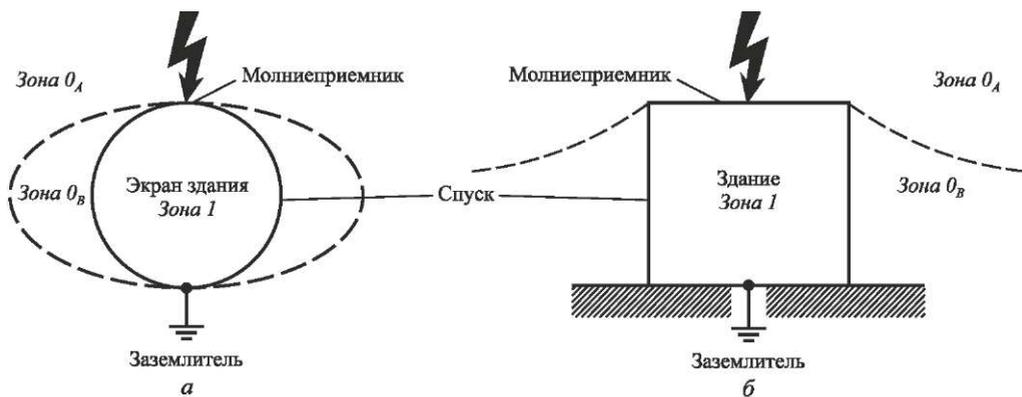


Рис. 4.7. Зоны при совмещении молниезащитного устройства со зданием:  
*а* – схема; *б* – пример

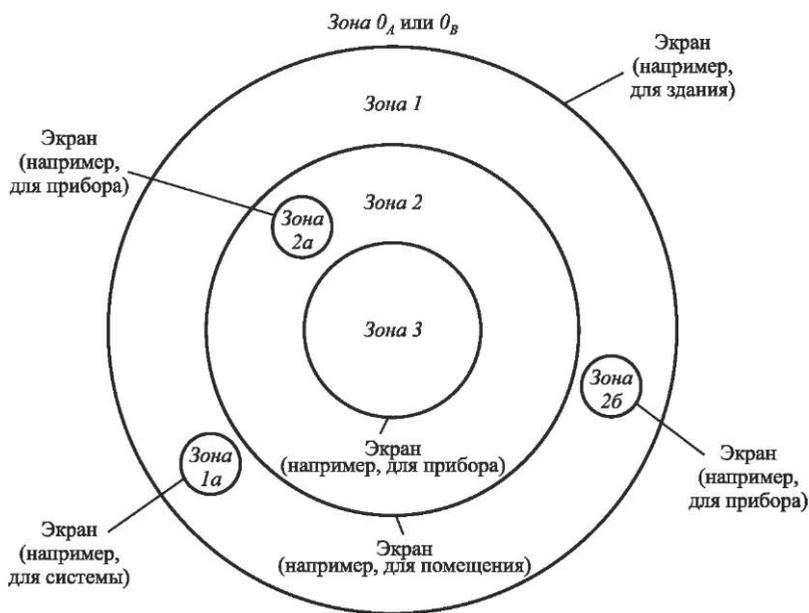


Рис. 4.8. Традиционные и локальные защитные зоны

Создание защитных зон требует глубоких знаний, нужно хорошо продумать разработку научно-технической системы защиты электронных, радиотехнических и иных устройств. Прежде всего рассматриваются уже имеющиеся или легко сооружаемые электромагнитные экраны, являющиеся металлическими компонентами строящегося объекта. К ним относятся, например, жестяные крыши и фасады, стальная арматура в бетоне, металлические конструкции в стенах, решетки. Внутренние или локальные защитные зоны, как правило, образуются кожухами, жестяными конструкциями, шкафами, корпусами приборов и т.д.

Единожды установленные защитные зоны, как правило, являются базой для дальнейших мероприятий по ЭМС, если при их реализации не меняются электромагнитные условия в защитных зонах.

**Затухание в экранах зданий и помещений.** Принцип построения из стальной арматуры оконных и дверных рам электромагнитной клетки (экрана с отверстиями) показан на рис. 4.9. Впрочем, на практике при больших размерах сооружения невозможно каждое пересечение арматуры сварить или обеспечить в нем хороший контакт. Достижимая степень экранирования (фактор экранирования) применяемой стали показана на рис. 4.10 в области частот, представляющей интерес для грозовых помех – от 100 Гц до 1 МГц.

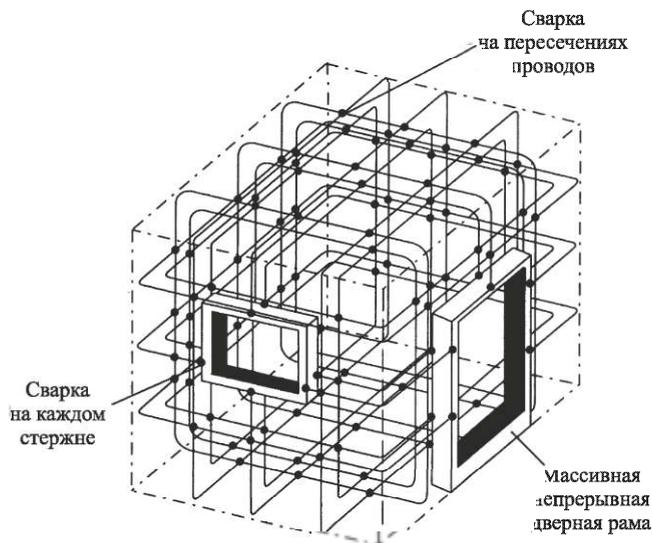


Рис. 4.9. Пространственный экран из стальной арматуры

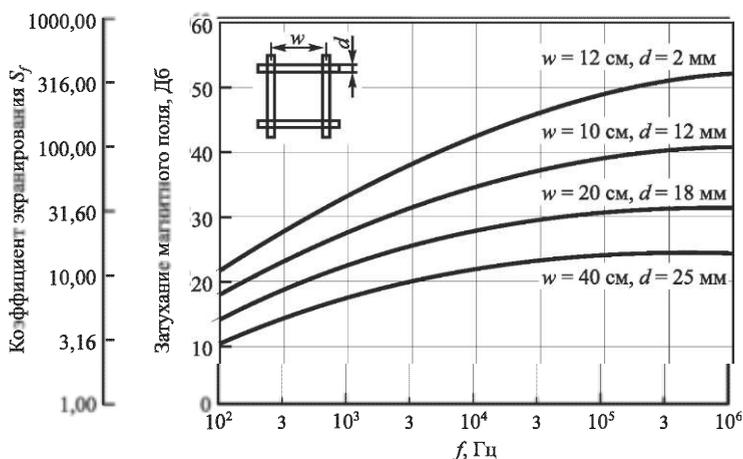


Рис. 4.10. Экранирующее действие сетки из стали

Зависимости затухания (см. рис. 4.10) справедливы и при воздействии магнитного поля на экран из конструкционной стали.

Экранирующее действие экрана с отверстиями при протекании через него тока молнии в настоящее время не поддается расчетам, поэтому экранирующее действие определяется при предположении квазистационарных приближений. Оценивается

напряженность поля в отверстии экрана. Эта оценка, как правило, дает заниженное значение напряженности поля по сравнению с полем, характерным при традиционном сооружении молниезащитного устройства. Для традиционной молниезащиты класса I достаточны провода диаметром не менее 4,5 мм (медь), 5,6 мм (алюминий) и 8 мм (сталь) с расстоянием между ними не более 10 м.

В первом приближении можно рассматривать строительное сооружение при обтекании током молнии как экран – «беличью клетку», сверху и снизу замкнутую проводящими пластинами при сохранении симметрии и поперечных связей. Такой «беличий» экран образуется стальным скелетом, вертикальными стержнями, стальной арматурой. Дальнейшее упрощение сводится, как правило, к замене прямоугольных отверстий заданных размеров в экране круглыми радиусом  $r$ :

$$r = (a + b)/\pi,$$

где  $a$  и  $b$  – стороны прямоугольного сечения экрана.

Следующим шагом задается индукционная петля внутри экрана (рис. 4.11), которая на практике может быть образована металлическими конструкциями, в частности, силовыми кабелями и сигнальными проводами.



Рис. 4.11. Клетка-экран, обтекаемая током молнии

Размер петли принимается равным радиусу клетки. Взаимная индуктивность  $M_s$  этой индукционной петли и клетки рассчитывается по формуле

$$M_s = \frac{0,1lw}{\pi r} \ln \left( \frac{w}{\pi d} \right),$$

где  $d$  – диаметр прутьев клетки;  $l$  – длина индукционной петли;  $r$  – радиус экрана круглого сечения;  $w$  – расстояние между стержнями экрана. Все размеры в этой формуле даны в метрах.

В качестве экрана традиционного молниезащитного устройства примем круглый экран-клетку с  $w = 10$  м и  $d = 8$  мм (провода из стали) в соответствии с классом I. Этот экран дает взаимную индуктивность  $M_p$  для описанной ранее петли.

Коэффициент экранирования равен отношению  $M_p/M_s$ .

Коэффициент экранирования

$$S = \frac{59,9}{w \ln \left( \frac{w}{\pi d} \right)},$$

или демпфирование экрана

$$D = 20 \log S.$$

Коэффициент экранирования идеализированного экрана-клетки из арматурных стержней с заданными размерами (см. рис. 4.10) приведен в табл. 4.1. В ней учтены различные шаги клетки.

Таблица 4.1

**Коэффициенты экранирования и затухания экрана-клетки, обтекаемого током молнии в зависимости от размеров клетки**

$w$ , см	$d$ , мм	Коэффициент экранирования $S$	Коэффициент затухания экрана $D$ , дБ
1,2	2	7710	77,7
10	12	614	55,8
20	18	257	47,5
40	25	92,0	39,3
100	50	32,4	30,2
200	100	16,2	24,2
1000	8	1	0

В табл. 4.2 приведена взаимная индуктивность  $M_s$ , отнесенная к длине  $l$  индукционной петли с размерами (см. рис. 4.11) при  $r = 10$  м.

Вследствие усреднения крутизны фронта тока индуцированное напряжение в петле  $U_s$  во время фронта равно

$$U_s = M_s I_{s \max} / T_1,$$

где  $M_s$  – взаимная индуктивность;  $I_{s \max}$  – максимальное значение тока;  $T_1$  – длительность фронта.

Ток короткого замыкания в петле за счет индуцированной ЭДС при пренебрежении активным сопротивлением

$$i_k = i M_s / L_s,$$

где  $i$  – ток молнии;  $M_s$  – взаимная индуктивность;  $L_s$  – индуктивность индукционной петли.

Отношение

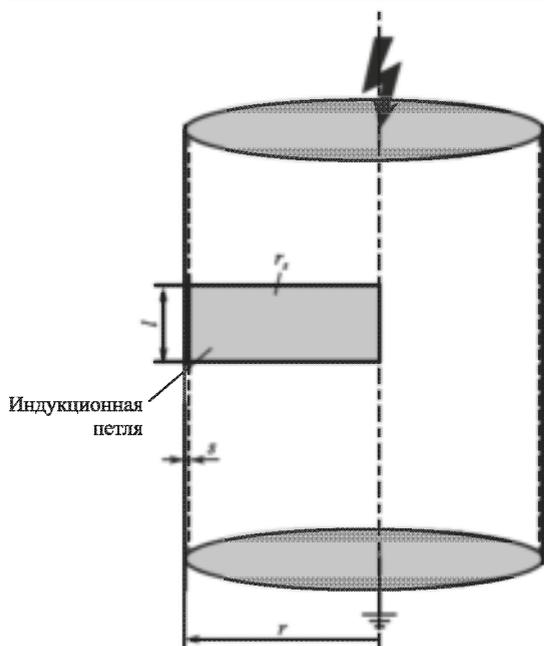
$$\frac{M_s}{L_s} = \frac{i \left( \frac{w}{r} \right) \frac{\ln \left( \frac{w}{\pi d} \right)}{4\pi}}{2\sqrt{l^2 + r^2} - 2(l+r) + l \ln \left[ \frac{2r/r_s}{l + \sqrt{1 + \left( \frac{r}{l} \right)^2} + r \ln \left( \frac{2l/r_s}{1 + \sqrt{1 + \frac{l}{r^2}}} \right)} \right]}$$

где  $d$  – диаметр стержня;  $l$  – длина индукционной петли;  $r$  – радиус экрана-клетки;  $r_s$  – радиус провода индукционной петли;  $w$  – шаг сетки экрана.

Таблица 4.2

**Удельная взаимная индуктивность при протекании тока молнии по экрану-клетке  $r = 10$  м**

$w$ , см	$d$ , мм	$M_s$ , нГн/м
1,2	2	0,0247
10	12	0,311
20	18	0,804
40	25	2,07
100	50	5,89
200	100	11,8
1000	8	191



Ток петли  $i_s$  при пренебрежимо малом активном сопротивлении изменяется во времени так же, как и ток молнии.

Расположенные по торцам экрана металлические диски могут рассматриваться как продолжение цилиндрического экрана, так как экран с круглым поперечным сечением описывается такими же уравнениями. Предполагая равномерное распределение тока по экрану, получим то же сопротивление связи для расчета наведенных в петле напряжения и тока (рис. 4.12).

**Рис. 4.12. Сплошной экран, обтекаемый током молнии**

При немагнитном листовом экране, обтекаемом током молнии, сопротивление связи  $R_k$  равно сопротивлению  $R$  постоянному току

$$R_k = R = \rho l / 2\pi r s,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала экрана;  $l$  – длина цилиндрической части экрана;  $s$  – толщина экрана;  $r$  – радиус цилиндрической части экрана.

Напряжение в петле на рис. 4.11 равно

$$U_s = RI_{\max},$$

где  $R$  – сопротивление постоянному току трубы экрана длиной  $l$ ;  $I_{\max}$  – максимальное значение тока молнии.

Согласно работе [26] длительность фронта напряжения  $U_s$  в петле  $T_{1/s}$  равна

$$T_{1/s} \approx s^2 / 4,4\rho.$$

Длительность импульса напряжения  $U_s$  в петле

$$T_{2/s} \approx T_2.$$

Максимальное значение тока  $I_s$  в короткозамкнутой петле (см. рис. 4.12), пренебрегая омическим сопротивлением петли,

$$I_s \approx I_{\max} (R/L_s) (T_2/0,7),$$

где  $R$  – сопротивление постоянному току трубчатого экрана длиной  $l$ ;  $L_s$  – собственная индуктивность петли, Гн,  $L_s \approx 2 \cdot 10^{-6}(l+r)$ ;  $I_{\max}$  – максимальное значение тока молнии;  $T_2$  – длительность импульса тока молнии;  $l$  – длина цилиндрической части экрана;  $r$  – радиус цилиндрической части экрана.

Пример расчета напряжения и тока в петле, находящейся внутри стержневого экрана, приведен на рис. 4.13.

Пример расчета параметров наведенных импульсов в петле, находящейся в сплошном экране квадратного сечения представлен на рис. 4.14.

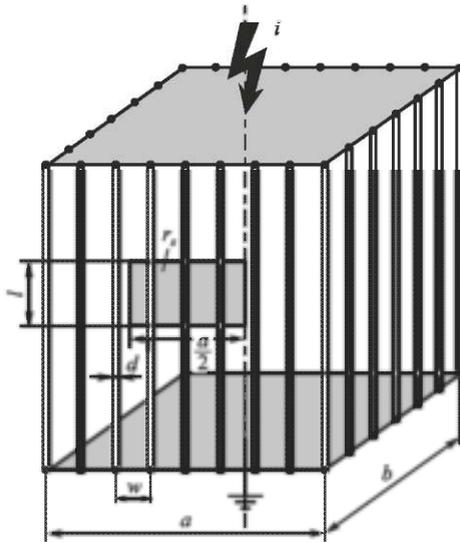
Следует обратить внимание на то, что в представленном примере учитывается падение напряжения в петле, находящейся в замкнутом экране. Индуцированное напряжение в петле при изменении магнитного поля не учитывается.

Для расчета замкнутого не обтекаемого током экрана можно воспользоваться данными работы [27], где анализируется и влияние отверстий в экране.

**Внешние и внутренние элементы системы электроснабжения на границах зон.** Прежде всего должны быть согласованы зоны промышленного сооружения между всеми элементами сооружения и четко определены все элементы системы электроснабжения и электрические провода, проходящие через зоны.

Так как система электроснабжения проникает через границы зон, что означает проникновение через электромагнитный экран, то в месте проникновения должны быть приняты соответствующие меры. Это относится не только к системе электропитания, но и к проводам, металлическим предметам, не находящимся под напряжением или не обтекаемым током в нормальных режимах. Такой мерой может быть установка разрядников или ограничителей перенапряжений, которые отводят на заземленный экран зоны токи помехи, обусловленные молнией.

Под общим термином «разрядник» обычно понимаются приборы, ограничивающие энергию, напряжение или ток, такие как разрядники со скользящими разрядом, газонаполненные разрядники, варисторы, ограничительные диоды, а также резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы и их комбинации, фильтры.



Пусть

$a = 13,9$  м;  $l = 3$  м;  $w = 10$  см;  $b = 17,5$  м;  $d = 12$  мм;  $r_s = 6$  мм.

	Первый импульс тока	Повторный импульс тока
$I$	200 кА	50 кА
$T_1$	10 мкс	0,25 мкс

Тогда

$$r = (13,9 + 17,5)/\pi = 10 \text{ м;}$$

$$M_s = \frac{0,1 \cdot 3 \cdot 0,1}{10\pi} \ln\left(\frac{0,1}{0,012\pi}\right) = 932 \cdot 10^{-6} \text{ мкГн} = 0,932 \text{ нГн;}$$

$$S = \frac{59,9}{0,1 \ln\left(\frac{0,1}{0,012\pi}\right)} = 614.$$

(Коэффициент затухания экрана =  $20 \log 614 = 55,8$  ДБ<sup>м</sup>);

$U_s = 0,932 \cdot 200/10 = 18,6$  В для 10 мкс при первом импульсе;

$U_s = 0,932 \cdot 50/0,25 = 186$  В для 0,25 мкс при повторном импульсе;

$$\frac{M_s}{L_s} = \frac{3 \left(\frac{0,1}{10}\right) \ln\left(\frac{0,1}{0,012\pi}\right)}{4\pi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{3^2 + 10^2} - 2(3+10) + 3 \ln\left[\frac{2 \cdot 10}{0,006} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{10}{3}\right)^2}}\right] + 10 \ln\left[\frac{2 \cdot 3}{0,006} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{3}{10}\right)^2}}\right]} = 30,4 \cdot 10^{-6};$$

$$i_{s/\text{мкс}} = 200 \cdot 10^3 \cdot 30,4 \cdot 10^{-6} = 6,08 \text{ А при первом импульсе;}$$

$$i_{s/\text{мкс}} = 50 \cdot 10^3 \cdot 30,4 \cdot 10^{-6} = 1,52 \text{ А при повторном импульсе.}$$

\* По сравнению с обычным защитным устройством с  $w = 10$  м и  $d = 8$  мм в данном примере коэффициент экранирования возрос в 614 раз.

Рис. 4.13. Стержневой экран

Пусть

$a = 4,5$  м;  $l = 3$  м;  $r_s = 6$  мм;  $b = 4,9$  м;  $s = 1,5$  мм;

$O_p = 29 \cdot 10^{-9}$  Ом · м.

Первый импульс тока:

$$I_1 = 200 \text{ кА; } T_1 = 350 \text{ мкс}$$

Тогда

$$r = (4,5 + 4,9)/\pi = 3 \text{ м;}$$

$$R = 29 \cdot 10^{-9} \cdot 3 / (2\pi \cdot 3 \cdot 0,0015) = 3,08 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 3,08 \text{ мкОм;}$$

$$U_s = 3,08 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 0,615 \text{ В;}$$

$$T_{1/s} \approx 1,5^2 / (4,4 \cdot 29 \cdot 10^{-3}) = 17,6 \text{ мкс;}$$

$$T_{2/s} \approx 350 \text{ мкс.}$$

Квадратная петля ( $a/2 = l$ ):

$$L_s \approx 2 \cdot 10^{-6} \cdot (3 + 3) = 12 \text{ мкГн;}$$

$$L_s \approx 200 \cdot 10^3 \cdot (3,08 \cdot 10^{-6} / 12) (350/0,7) = 25,7 \text{ А.}$$

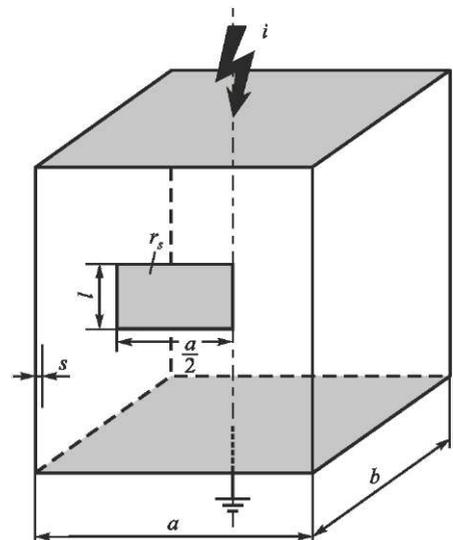


Рис. 4.14. Сплошной экран квадратного сечения

Система электрических коммуникаций при переходах из зоны  $\theta$  в зону  $1$ , и провода, проложенные поверх земли из зон  $\theta_A$  или  $\theta_B$  в зону  $1$  показаны на рис. 4.15. В местах перехода, особенно для проводов электропитания, идущих из зоны  $\theta$ , должна быть предусмотрена возможность отведения части тока молнии, так как такие провода несут высокую энергию помех. Все без исключения линии электропитания и другие электрические коммуникации, идущие из защищенного объема в другую зону, должны быть снабжены на границе перехода защитными устройствами.

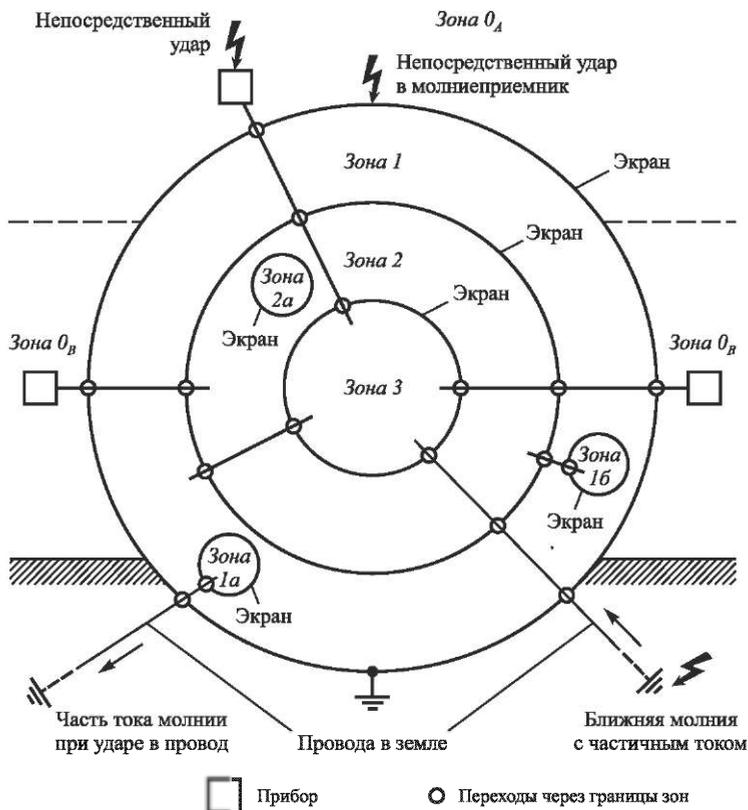


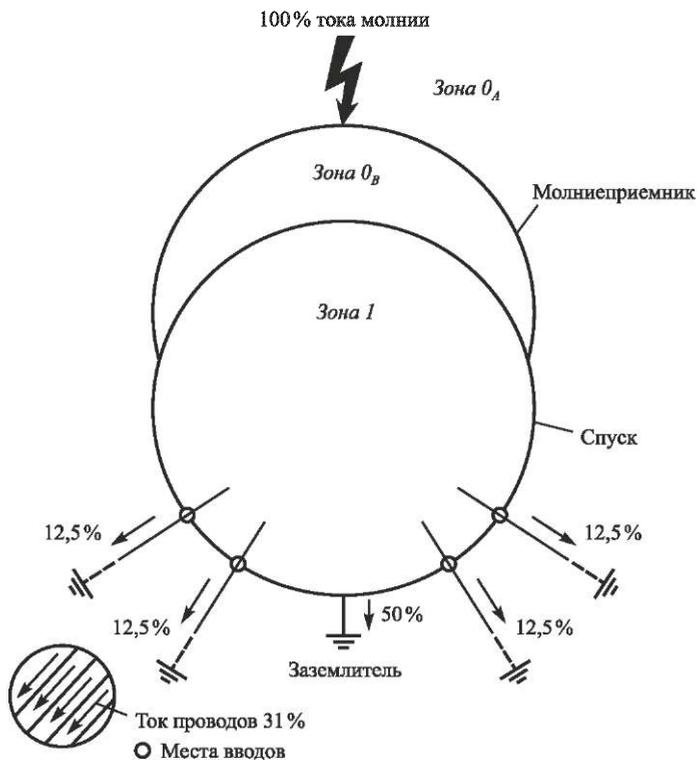
Рис. 4.15. Места переходов на границах зон

Отводимая на границах энергия, представляющая собой в основном магнитную энергию индуктированных помех, значительно меньше, чем на границе зон  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  и  $1$ .

При непосредственном ударе молнии ток протекает не только через заземляющее устройство, но значительная часть тока течет в зоне  $1$  или  $\theta_B$  на землю через систему внешних проводов, которая на входе связана с экраном зоны  $1$ .

Технический комитет 81 МЭК рекомендует считать, что 50% тока отводится через силовые кабели, а 50% тока протекает по заземлению. Предполагается, что ток молнии равномерно распределяется по всем металлическим коммуникациям и электрическим проводам (рис. 4.16). Если система электроснабжения состоит из нескольких проводов, например, из фазного и защитного проводов, а кабель связи – из нескольких отдельных жил, то можно предположить, что ток молнии распределяется равномерно по всем проводам. Внешняя сторона экрана электрически соединена с ними, а внутренняя – либо соединена электрически, либо через разрядники. Экран можно считать единым

проводом. При замкнутом внешнем кабельном экране большая часть тока протекает, чем по внутренним проводам. Распределение тока зависит от сопротивления связи и его можно определить индивидуально в каждом конкретном случае.



**Рис. 4.16. Разветвление тока молнии по внешней системе электроснабжения при прямом ударе в здание**

Вполне возможно, что при ближнем ударе молнии в единую систему электроснабжения большая часть тока придется в точку присоединения к защитной зоне 1, и тогда последствия можно оценить как при прямом ударе в эту точку (рис. 4.17). Это учитывается в зонной концепции.

В точке пересечения зоны 0<sub>A</sub> и 1, желательно выполнить соединение с малым полным сопротивлением внешних проводов и экрана зоны 1. Уравнивание потенциала требуется осуществлять в форме единой шины или в виде многих присоединений проводящего экрана – оболочки кабеля.

Ток первого импульса молнии во внешней системе электроснабжения в зоне 0<sub>A</sub> имеет длительность фронта порядка 10 мкс и длительность импульса 350 мкс.

Ток через провод в зоне 1 при фронте 10 мкс имеет существенно меньшую длительность. Причиной этого является действующее индуктивное сопротивление ( $\omega L$ ) соединительных проводов и элементов здания, для которых высокочастотная составляющая меньше, чем высокочастотная составляющая на фронте импульса (рис. 4.18). Поэтому более эффективен отвод низкочастотной составляющей тока. Типичным током в проводах в зоне 1 является импульсный ток с параметрами 8/20 мкс, который используется для испытаний защитных устройств.

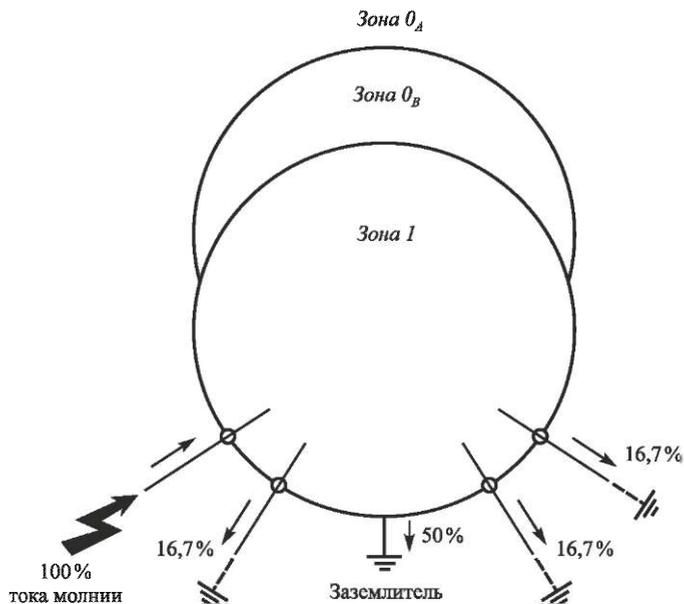


Рис. 4.17. Распределение тока молнии при ударе во внешнюю систему электроснабжения вблизи здания

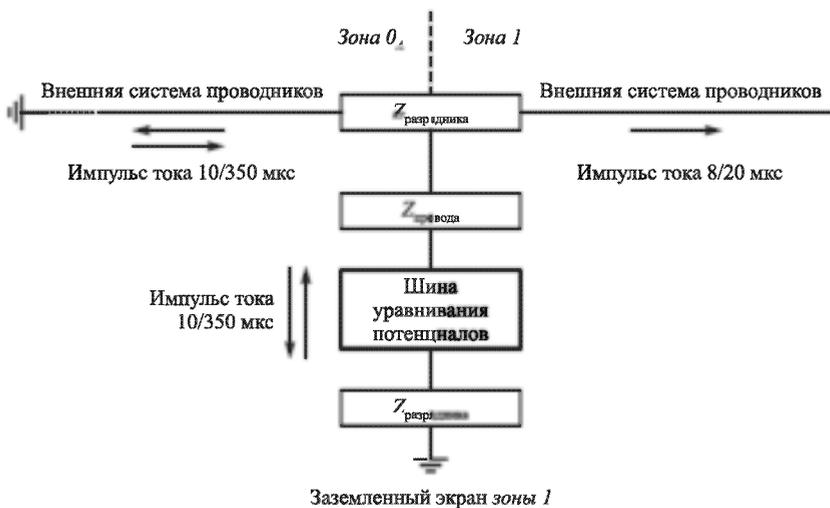


Рис. 4.18. Импульсные токи во внешней и внутренней системах проводов

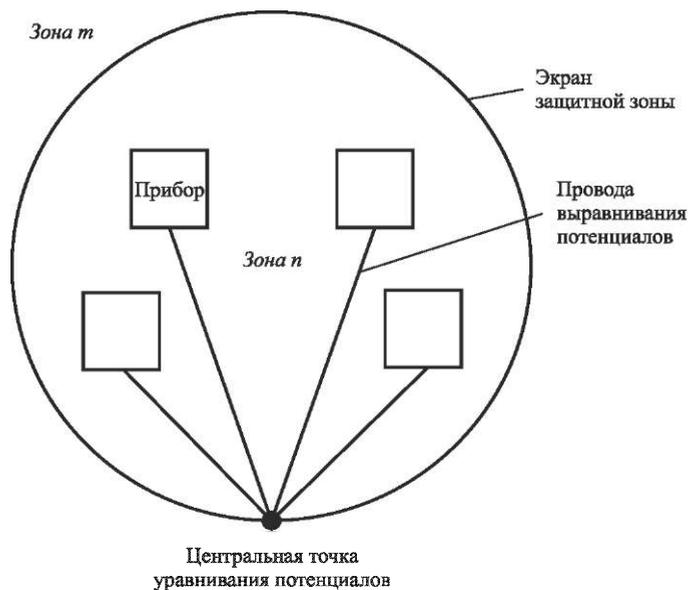
## 4.2. Уравнивание потенциалов

Для электротехнических устройств уравнивание потенциалов может быть реализовано в виде:

- сетки;
- звезды;
- в совмещенном с конструкцией.

Защитные мероприятия в соответствии с зонной концепцией молниезащиты могут осуществляться уравниванием потенциалов в каждой зоне, начиная от 1-й до  $n$ -й.

На рис. 4.19 показан принцип звездообразного уравнивания потенциала в молниезащитной зоне. Металлический корпус или каркас соединен проводами уравнивающими потенциал в одной точке, которая в свою очередь связана с экраном зоны. Так выполняется лучевая прокладка проводов, уравнивающих потенциал. Смысл ее – ослабить низкочастотные активные петлевые токи в системе уравнивания потенциалов. Так как в каждой защитной зоне при воздействии тока молнии имеется остаточное магнитное поле, то необходимо ослабить индуктированные им петлевые токи. Для этого требуются все приборы и уравнивающие потенциал провода и прочие металлические предметы в защитной зоне изолировать от металлических предметов, расположенных в ней (рис. 4.20).

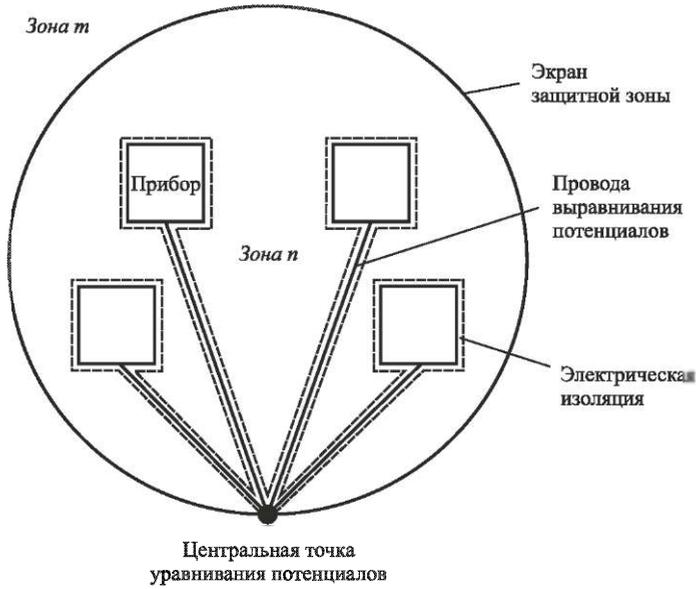


**Рис. 4.19. Звездообразная система уравнивания потенциалов в молниезащитной зоне**

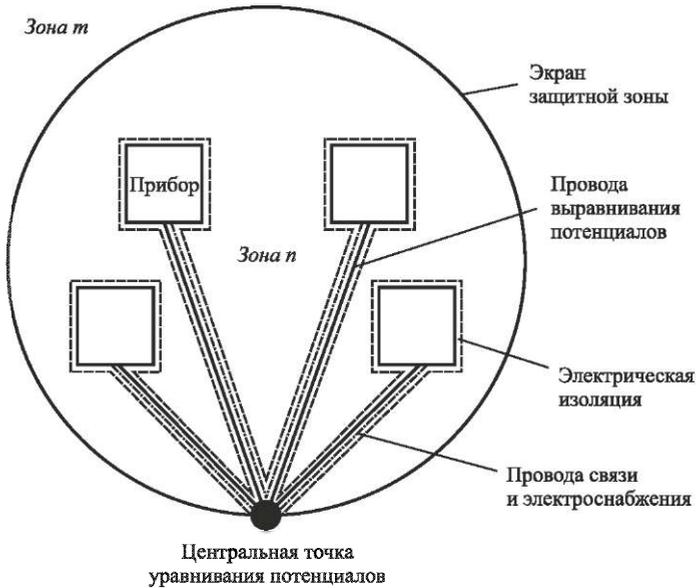
Однако провода электроснабжения, линии связи и системы уравнивания потенциалов не должны образовывать индукционные связи, поэтому эти провода необходимо прокладывать строго параллельно друг другу (рис. 4.21). Соединения приборов возможны в центральной точке уравнивания потенциалов.

Ввод в защитную зону проводов должен проводиться исключительно в месте центральной точки системы уравнивания потенциалов; здесь для поступающих проводов существует граница зоны и здесь присоединяются, например разрядники (рис. 4.22).

Особый случай звездообразного уравнивания потенциалов представляет собой древовидная система уравнивания (рис. 4.23). Здесь также все приборы соединяются проводами, изолированными от остальных металлических предметов, находящихся в зоне. Вводы осуществляются в центральной точке системы уравнивания потенциалов. Провода электропитания и связи прокладывают строго параллельно проводам системы уравнивания потенциалов. В технике молниезащиты звездообразное или древовидное выполнение системы уравнивания потенциалов для миниатюрных и локальных устройств не находит широкого применения, так как длина проводов системы уравнивания потенциалов при имеющих место частотах ограничена (порядка метров).



**Рис. 4.20.** Изоляция приборов и проводов системы уравнивания потенциалов относительно металлических предметов в зоне при звездообразной системе уравнивания потенциалов



**Рис. 4.21.** Звездообразная схема соединения проводов электроснабжения и связи при звездообразной системе уравнивания потенциалов

Здесь прибор, изолированный от металлических элементов, с помощью изолированного провода соединен с центральной точкой системы уравнивания потенциалов (рис. 4.24). Следовательно, устраняется протекание активных и индуктивных выравнивающих токов. В схеме замещения провод уравнивания потенциала представляется

П-четырёхполосником, содержащим индуктивности  $L_L$  и емкости  $C_L$ . Емкость распределена между началом и концом схемы. В начале схемы, в центральной точке системы уравнивания потенциалов, емкость закорочена. В конце схемы параллельно емкости провода подключена емкость  $C_G$  прибора относительно металлических компонентов защитной зоны.

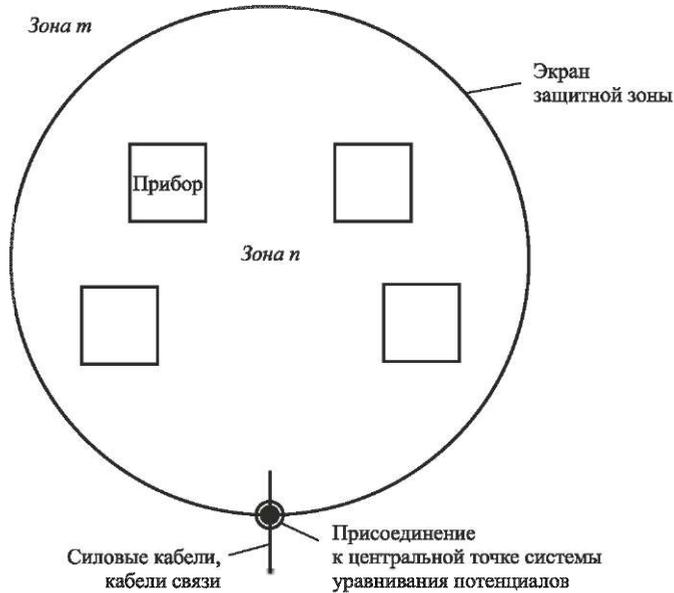


Рис. 4.22. Центральный ввод приводов в зону со звездообразной системой уравнивания потенциалов

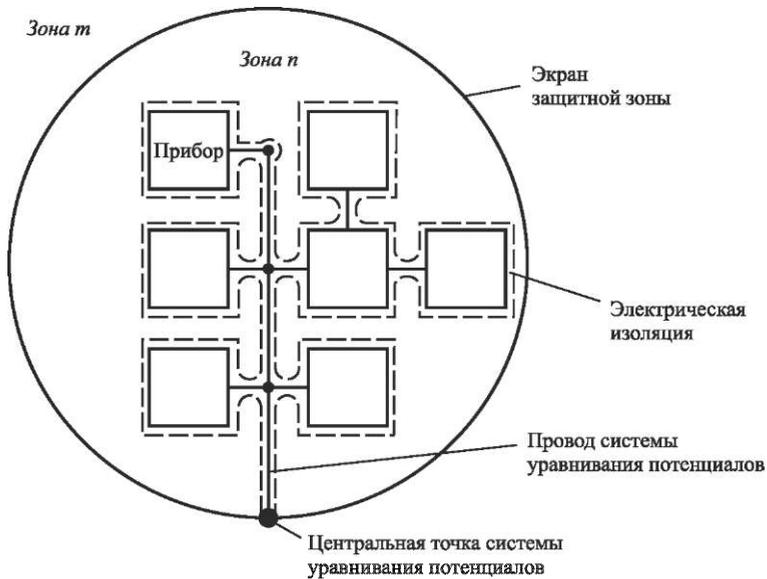
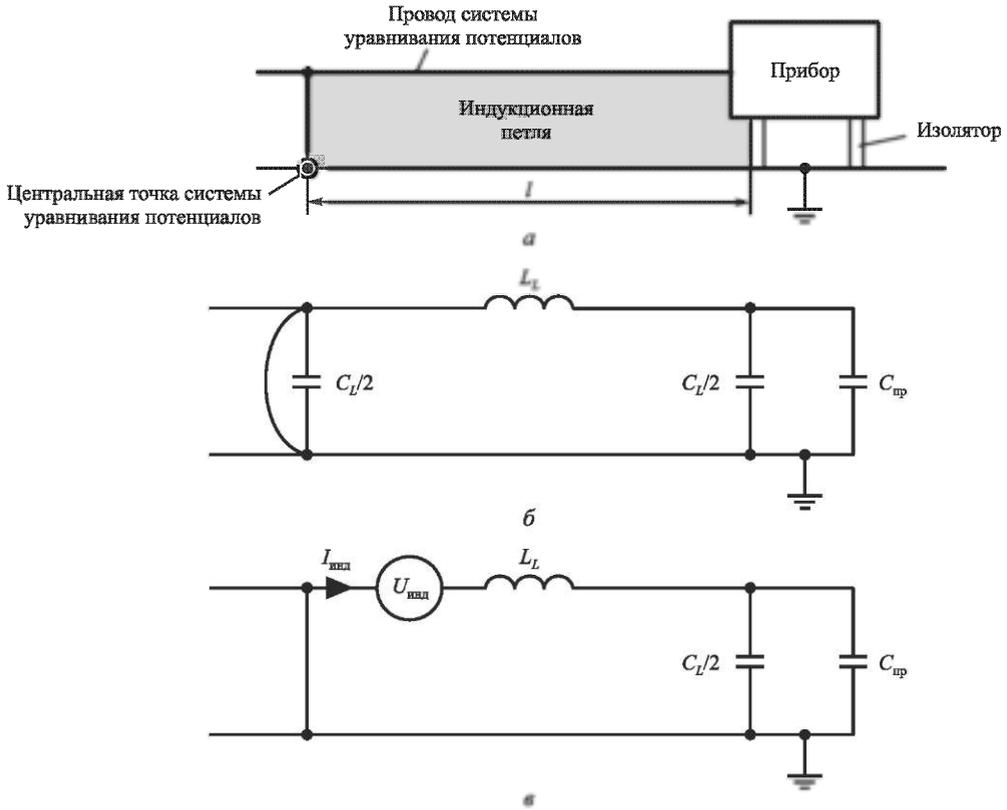


Рис. 4.23. Древовидная система уравнивания потенциалов в защитной зоне



**Рис. 4.24.** Лимитированная длина проводов уравнивания потенциалов в звездообразной системе:

$L_L$  – индуктивность провода;  $C_L$  – емкость провода;  $C_{пр}$  – емкость прибора;  $l$  – длина провода;  $U_{инд}$  – индуктивное напряжение;  $I_{инд}$  – ток, вызванный  $U_{инд}$

В проводах системы уравнивания потенциалов и на приборе относительно металлических элементов защитной зоны индуцируется напряжение помехи  $U_{инд}$  за счет магнитного поля. Из-за этого в проводах и приборе протекают токи помехи  $i_{инд}$ , и поэтому необходимо, чтобы емкостное сопротивление конца провода было бы больше индуктивного сопротивления конца провода, т.е. чтобы индуцированное напряжение существенно падало на емкостном сопротивлении в конце.

При этом должно выполняться следующее требование:

$$\frac{1}{\omega \left( \frac{C_L}{2} + C_G \right)} \gg \omega L_L,$$

где  $C_L = C'_L l$ ;  $L_L = L'_L l$ ;  $C'_L, L'_L$  – удельные (на 1 м) емкость и индуктивность провода соответственно;  $l$  – длина провода;  $C_G$  – емкость прибора;  $\omega$  – круговая частота индуцированной помехи.

Длина проводника

$$l \ll \sqrt{\left( \frac{C_G}{C'_L} \right)^2 + \frac{2}{\omega^2 L'_L C'}} - \frac{C_G}{C'_L}.$$

Если принять типичную удельную индуктивность провода 1,00 мкГн/м и типичную емкость – 7,05 пкФ/м, то

$$l \ll \sqrt{20 \cdot 10^{21} C_G^2 + 7,2 \frac{10^{15}}{f^2} - 142 \cdot 10^9 C_G},$$

где  $f$  – частота индуцированных помех.

Если, например, емкость прибора равна 100 пкФ, то при принятых предположениях верхняя граница будет выше 10 МГц при длине  $l \ll 2,3$  м, хотя допустимая длина при указанной частоте  $l \approx 72$  м.

Можно сформулировать требования к длине  $l$  и так:  $l$  должна быть меньше минимальной длины волны индуцированных помех.

Так как при защитных мероприятиях доля индуцированных частот в ток лежит в мегагерцовой области, то размеры звездообразной или древовидной системы уравнивания потенциалов, как правило, не должны превышать нескольких метров, т.е. ее трудно реализовать в помещении.

Сетчатая система уравнивания потенциалов представлена на рис. 4.25. Приборы соединяются друг с другом, а также с металлическими частями защищенной зоны и экраном зоны по возможности многими и короткими проводами. При этом максимально используются имеющиеся в устройстве металлические элементы, такие как арматура в полу, стенах и на крыше, металлические решетки и двойные полы, металлическое оборудование неэлектрического назначения (трубы, вентиляционные и кабельные короба). Типичной является смешанная система с шагом сетки в несколько метров.

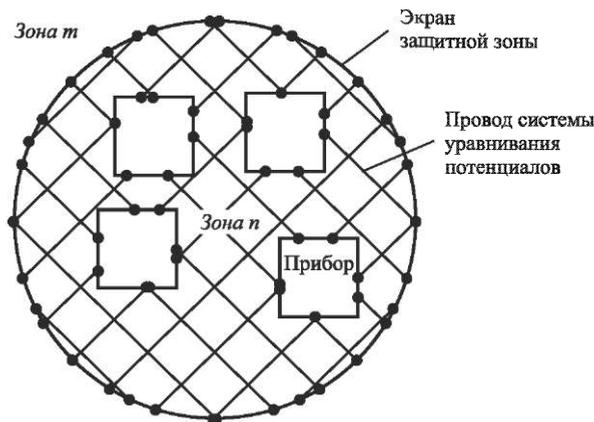
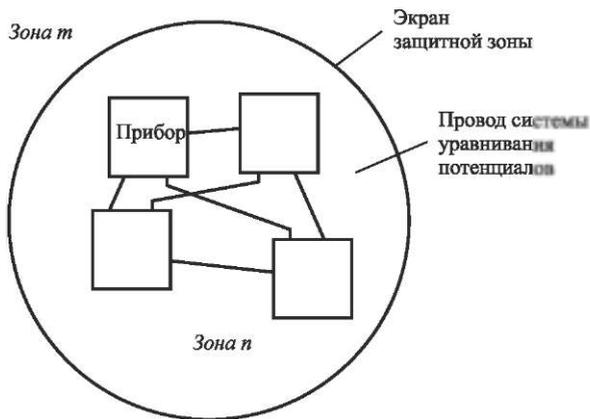


Рис. 4.25. Смешанная структура системы уравнивания потенциалов в молниезащитной зоне

Требований к изоляции приборов и проводов системы уравнивания потенциалов не предъявляется.

Приборы могут быть соединены любым образом проводами электропитания или связи (рис. 4.26).

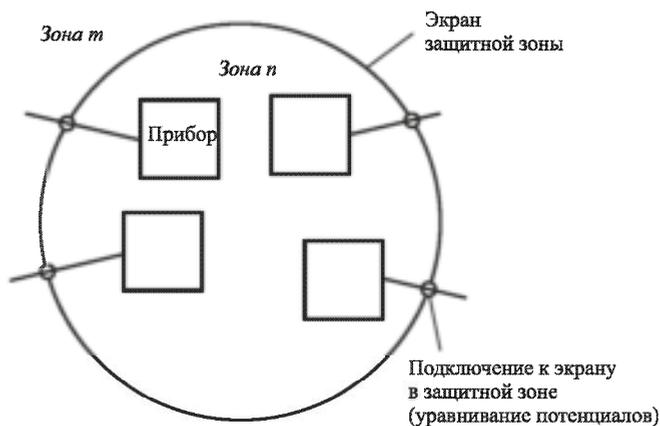
Сильно переплетенная система уравнивания потенциалов характеризуется выравниваемыми индуцированными токами, которые распределяются по многочисленным проводникам, а также по многим короткозамкнутым контурам, что ослабляет магнитное поле и поля, существующие вблизи силовых и сигнальных проводов.



**Рис. 4.26. Смешанная система прокладки кабелей электроснабжения и проводов связи в зоне с сетчатым выполнением системы уравнивания потенциалов**

Внешний экран (медный плетеный экран, кабельные защитные трубы, закрытые кабельные каналы) и кабели электроснабжения, провода связи образуют смешанную систему уравнивания потенциала.

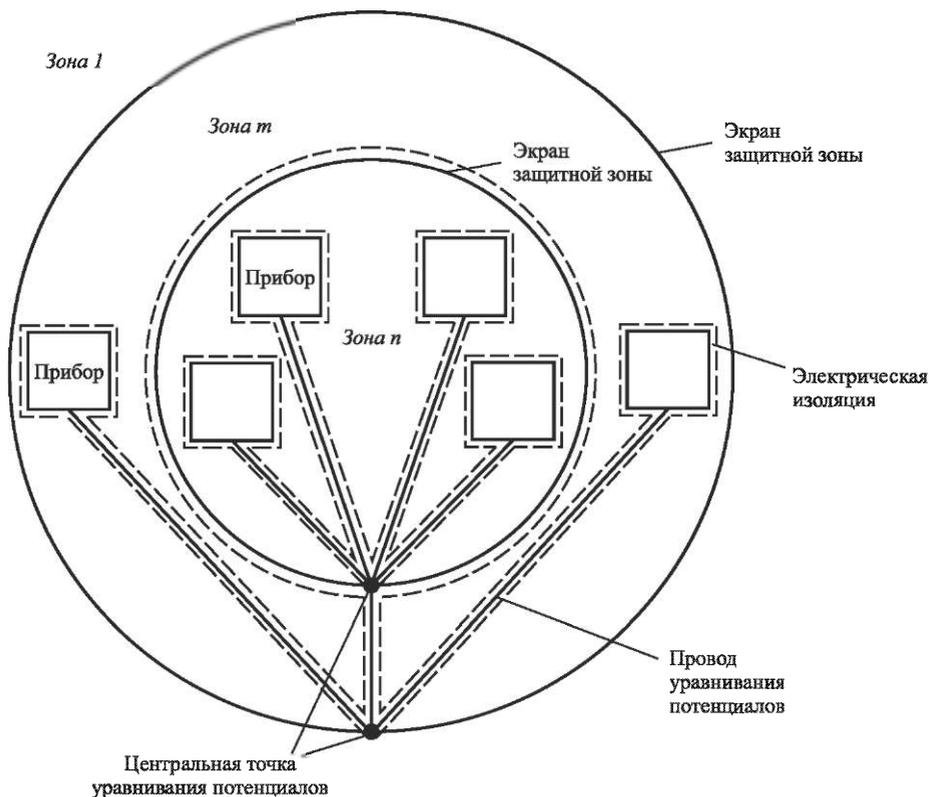
Провод, входящий снаружи в защитную зону, может пересекать экран зоны в любом месте (рис. 4.27). При пересечении экрана он должен снабжаться разрядником.



**Рис. 4.27. Подключение на периферии защитной зоны проводов при смешанной системе уравнивания потенциалов**

Далее будет показано, как звездо- или древообразные системы уравнивания потенциала связаны друг с другом в определенной защитной зоне.

Связь двух звездообразных систем уравнивания потенциалов в двух защитных зонах показана на рис. 4.28. Центральная точка уравнивания потенциала в *зоне т* связана с экраном этой зоны. От точки *зоны т* идут изолированные провода к точке *зоны п* звездообразной системы уравнивания потенциалов. Провода связаны с экраном *зоны п*. При этом следует стремиться к тому, чтобы экран защитной *зоны п* был изолирован от металлических предметов *зоны т*.



**Рис. 4.28. Соединение двух гродозащитных зон звездобразной системой уравнивания потенциалов**

Первый вариант соединения защитной зоны  $t$  с разветвленной системой уравнивания потенциалов и защитной зоной  $n$  со звездобразной системой уравнивания потенциалов показан на рис. 4.29. Здесь экран защитной зоны  $n$  введен в защитную зону  $t$  с разветвленной (сеточной) системой уравнивания потенциала; центральная точка уравнивания потенциала зоны  $t$  располагается на экране защитной зоны  $n$ . Все металлические части защитной зоны  $n$  изолированы от экрана этой зоны.

Второй вариант продемонстрирован на рис. 4.30. Здесь экран зоны  $n$  через центральную точку уравнивания потенциала зоны  $n$  соединен с разветвленной (сетчатой) системой уравнивания потенциала защитной зоны  $t$ , и соответственно изолирован от металлических компонентов зоны  $t$ .

Соединение двух зон с сетчатой системой уравнивания потенциала, причем экраны объединены с устройствами уравнивания потенциала показаны на рис. 4.31.

Соединения защитной зоны  $t$  со звездобразной системой уравнивания зоны  $n$  с сетчатой системой уравнивания потенциалов, причем внутренняя защитная зона  $n$  соединена изолированным проводом с центральной точкой уравнивания потенциалов защитной зоны  $t$ ; система уравнивания потенциалов зоны  $n$ , включая экран зоны  $n$ , изолирована от зоны  $t$  изображены на рис. 4.32.

Комплексная структура защитной зоны, в которой перемешаны защитные и локальные защитные зоны с различными связанными друг с другом системами уравнивания потенциала показана на рис. 4.33.

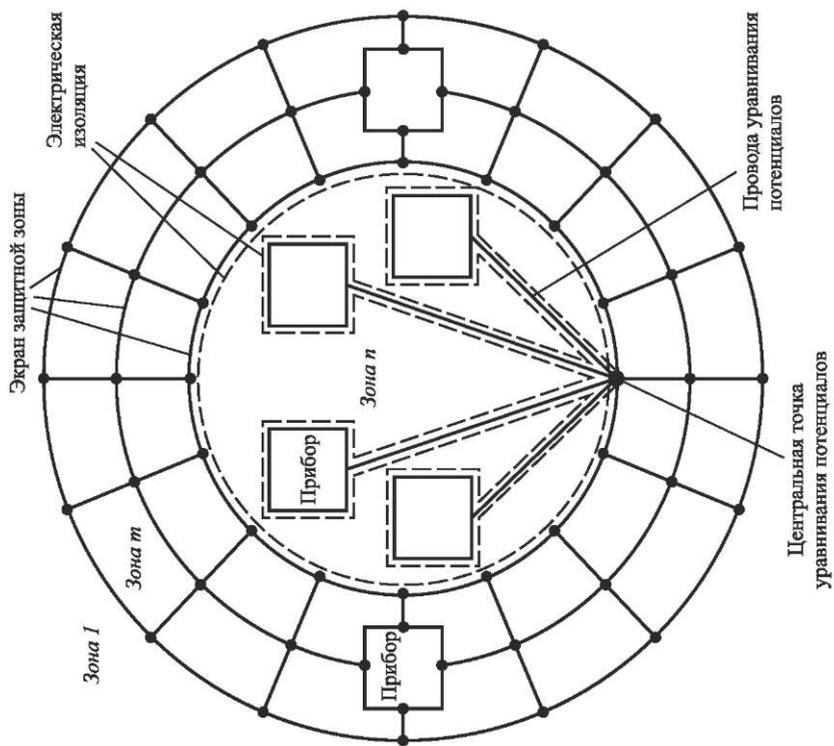


Рис. 4.29. Соединение зон молниезащиты с сетчатой и звездообразной системой уравнивания потенциалов (1-й вариант)

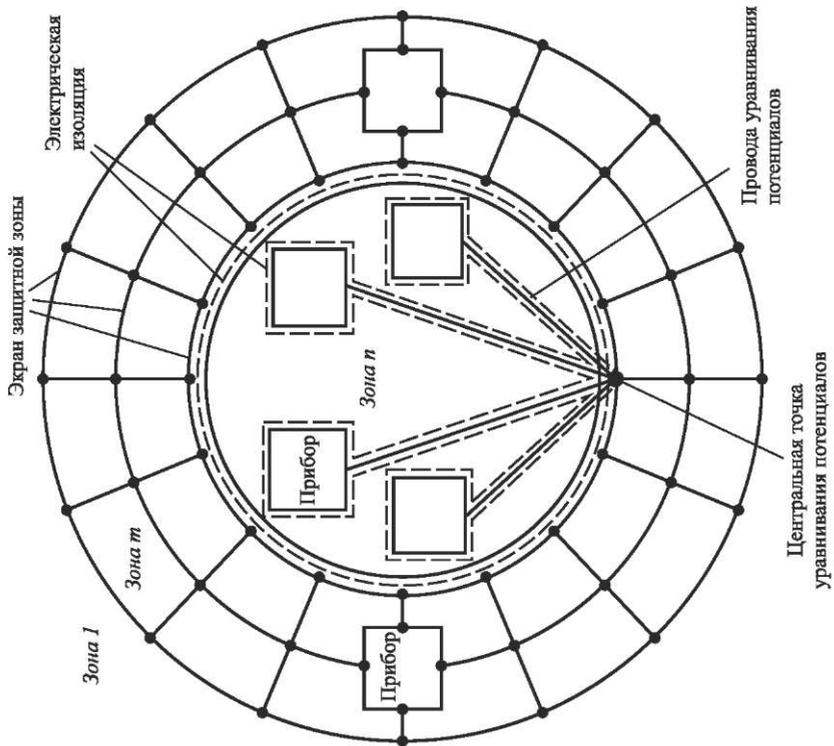


Рис. 4.30. Соединение зон молниезащиты с сетчатой и звездообразной системой уравнивания потенциалов (2-й вариант)

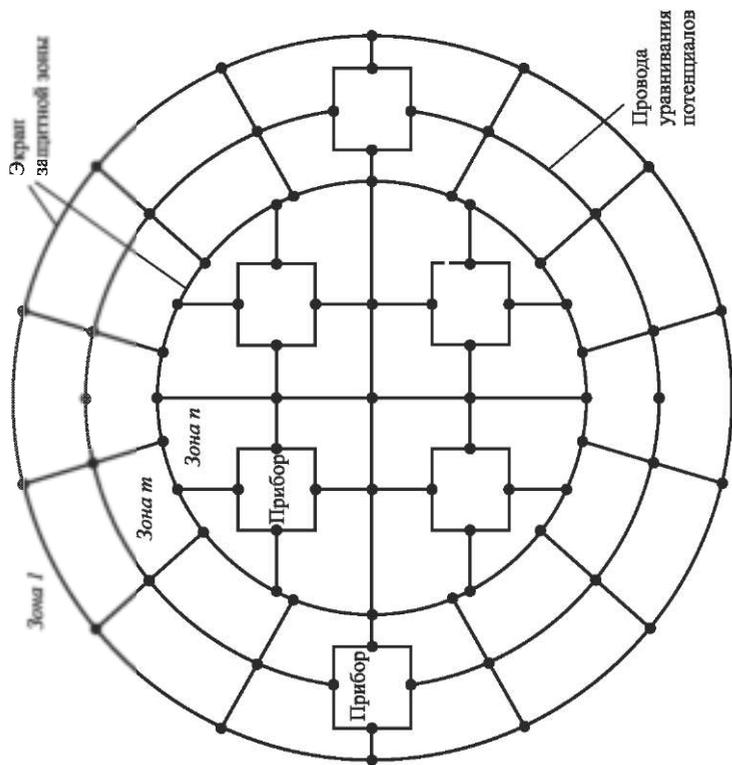


Рис. 4.31. Соединение многослойных зон с сетчатой системой уравнивания потенциала

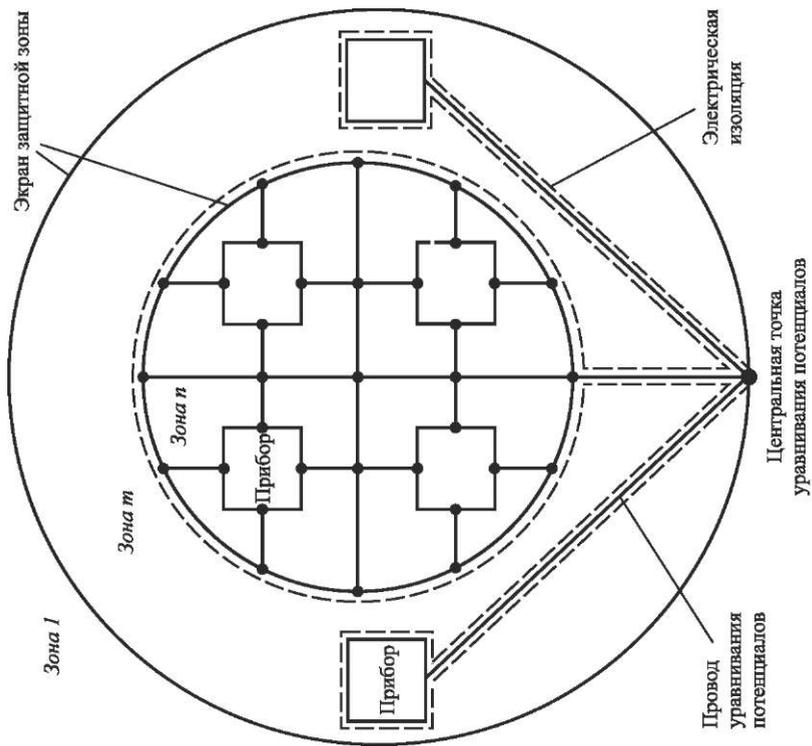
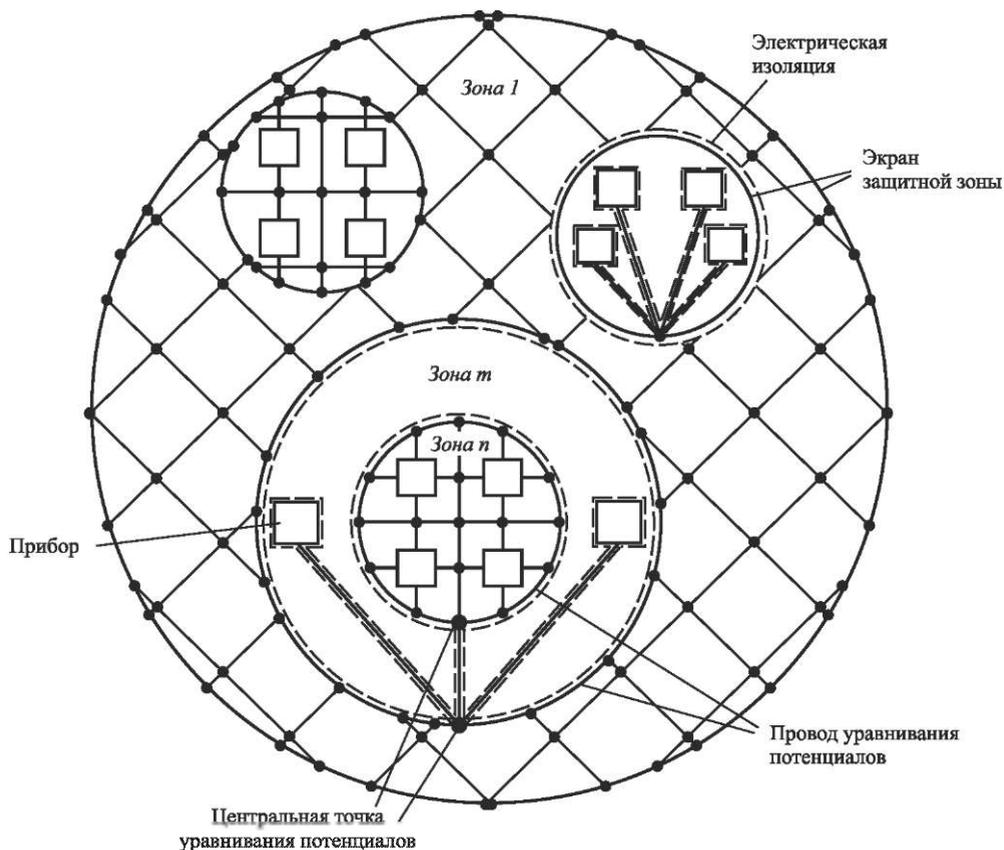


Рис. 4.32. Соединение защитных зон со звездообразной и сетчатой системой уравнивания потенциала



**Рис. 4.33. Комплексное соединение защитных зон с сетчатой и звездообразной системами уравнивания потенциала**

**Соединение защитных зон с проводящими экранами.** Две локально пространственно разделенные молниезащитные зоны с помощью экранированного провода (в виде металлической защитной трубы, экранированной кабельной трассы или внешнего кабельного экрана) создают единую молниезащитную зону (рис. 4.34). Соединение проводов между двумя первоначальными зонами должно быть выполнено с соблюдением следующих ограничений.

Если через проводящий экран протекает большой ток молнии, возникает относительно высокое продольное напряжение между обоими экранами вследствие сопротивления связи. Это продольное напряжение действует между обеими системами уравнивания потенциалов зон. Если оно ниже электрической прочности приборов и проводов, то это не критично. Если же оно превышает электрическую прочность прибора, то провода подключаются к экранированной зоне через разрядники.

Для анализа цилиндрического неферромагнитного экрана в виде трубы пригодны рекомендации, представленные в работе [27]. Часто прибегают к приему, когда вместо идеальной трубы-экрана используют заземленный экранирующий провод, например вместе с проложенным в земле информационным кабелем. Этот прием позволяет разгрузить провод от части тока молнии, может быть достаточным или недостаточным для того, чтобы зона удовлетворяла сформулированным требованиям. Среди проводов и их

экранов имеющееся продольное напряжение определяется взаимной индуктивностью между защищаемыми проводами и экранирующими (при пренебрежении падением напряжения на активном сопротивлении экранирующего провода). Типичные расположения экранирующих проводников и расчет соответствующих им продольных индуктивностей  $M'$  показаны на рис. 4.35. При армировке стальной кабельных каналов система имеет математическое решение. Если имеются продольные стержни, то можно рассматривать один канал квадратного сечения.

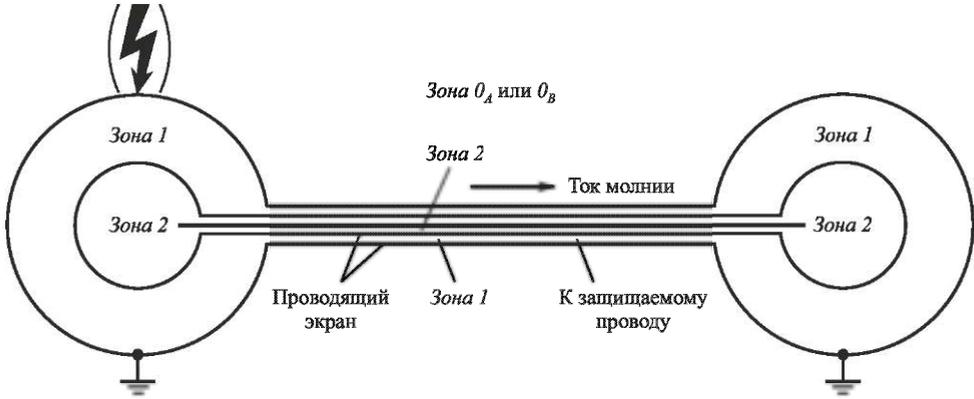


Рис. 4.34. Соединение проводящим экраном в промышленном устройстве двух локальных зон

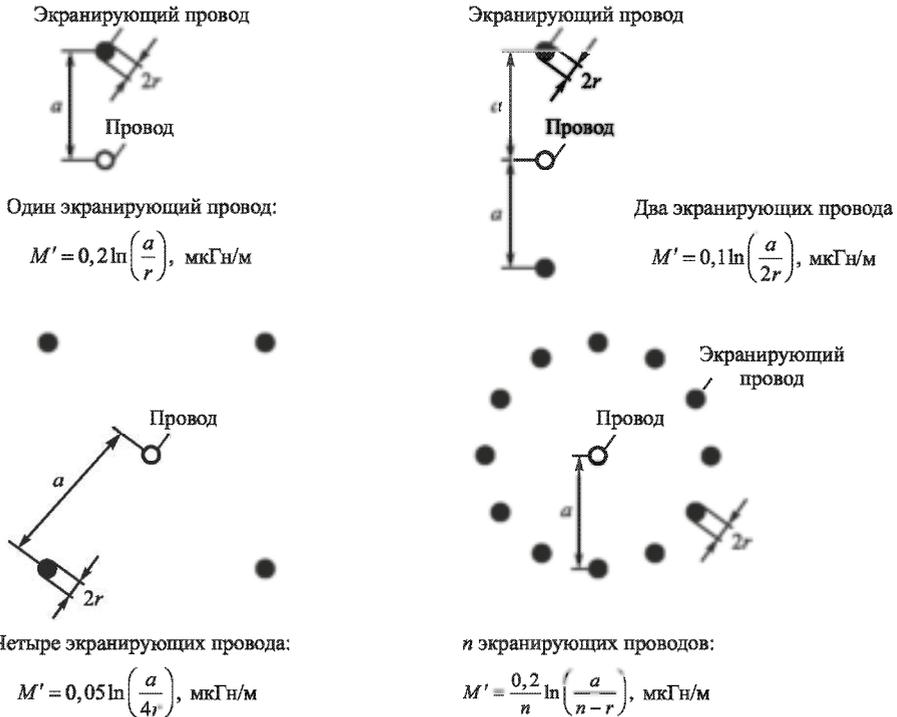


Рис. 4.35. Расчет взаимной индуктивности экранирующих проводов и защищаемого провода

При квазистационарном рассмотрении получается решение для продольного напряжения  $U_1$  в течение времени  $T_1$

$$U_1 = M' I_{\max}' / T_1,$$

где  $M'$  – продольная взаимная индуктивность, мкГн/м;  $l$  – длина экранирующего провода, м;  $I_{\max}'$  – максимальное значение тока молнии, А;  $T_1$  – длительность фронта тока в экранирующем проводе, мкс.

Пример (рис. 4.36).

Пусть  $n = 16$ ,  $l = 100$  м;  $a = 2(1 + 0,75)/\pi = 1,11$  м;  $M' = (0,2/16) \ln [1,11/(16 \cdot 0,005)] = 0,0329$  мкГн; ток  $I_{\max}'$  первой вспышки молнии равен 50 кА, а второй – 12,5 кА, длительность фронта тока первой вспышки 10 мкс, второй – 0,25 мкс.

Тогда при первом импульсе

$$U_1 = 0,0329 \cdot 100 \cdot 50\,000 = 16,5 \cdot 10^3 \text{ В},$$

при втором импульсе

$$U_1 = 0,0329 \cdot 100 \cdot 12\,500/0,25 = 165 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

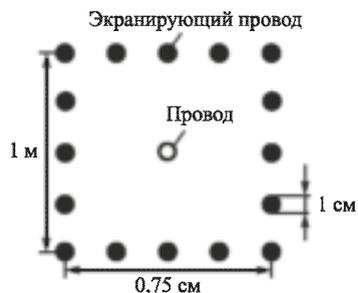


Рис. 4.36. Расчетная схема

### 4.3. Мероприятия по ограничению уровня помех

Пассивными мероприятиями, т.е. без системных подходов (например, включением разрядников), можно снизить помехи на входах приборов (рис. 4.37). Доминирующим влияющим фактором является индукция петель проводов между приборами и переменное магнитное поле тока молнии. Первым шагом является снижение электромагнитного поля (например, экранирование зон или увеличение коэффициента экранирования в 100 раз).

Альтернативой или дополнительным мероприятием может быть снижение вторым экраном площади индукционной петли путем параллельной прокладки проводов электропитания или сигнальных проводов. Заменой или завершением мероприятий может быть прокладка проводов в проводящем экране (например, в экранирующей трубе), причем экран на конце присоединяется к приборам. Возникающий ток короткого замыкания не воздействует на проводящий экран как продольное напряжение из-за сопротивления связи. Лишь при недостаточном снижении помех при прокладке и экранировании проводов на входах приборов следует включать разрядники, согласованные с электрической прочностью входов приборов.

Также возможно образовать локальную молниезащитную зону на корпусе прибора, либо соединив его неэкранированными проводами с разъемами на границе зоны, либо соединив экранированными проводами, и тем самым реализовать общую защитную зону для проводов и приборов.

**Устойчивость электронных приборов и систем** включает в себя устойчивость к кондуктивным помехам и к полевым воздействиям.

Устойчивость к кондуктивным помехам обычно определяется нормированными испытаниями (см. работу [27]):

- гибридным генератором – импульс напряжения 1,2/50 мкс, импульс тока 8/20 мкс, фиктивное внутреннее сопротивление 50 и 2 Ом;

– импульсным напряжением 10/700 мкс, фиктивное внутреннее сопротивление 15–41 Ом в зависимости от схемы. Этот импульс используется для телекоммуникационных устройств.

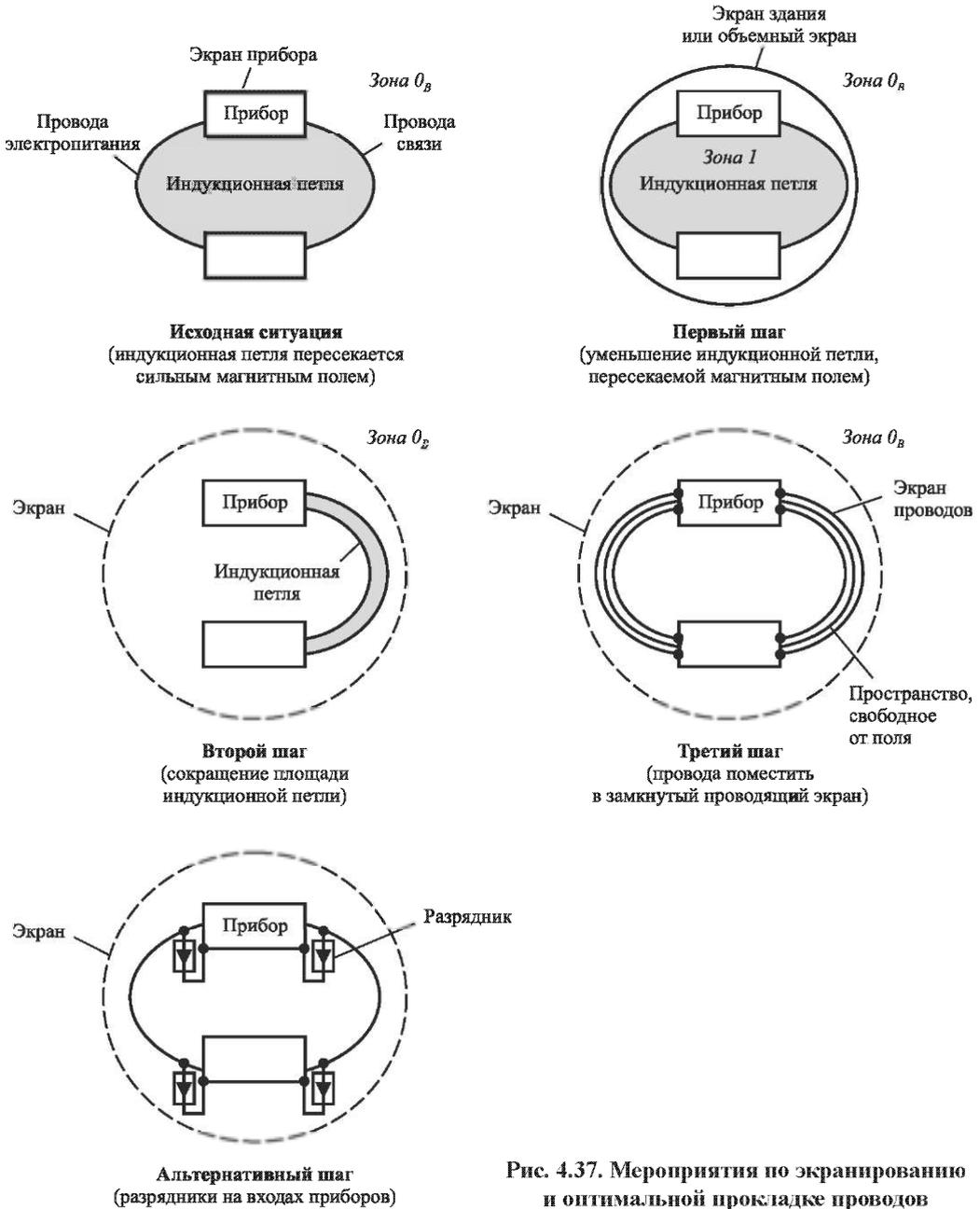


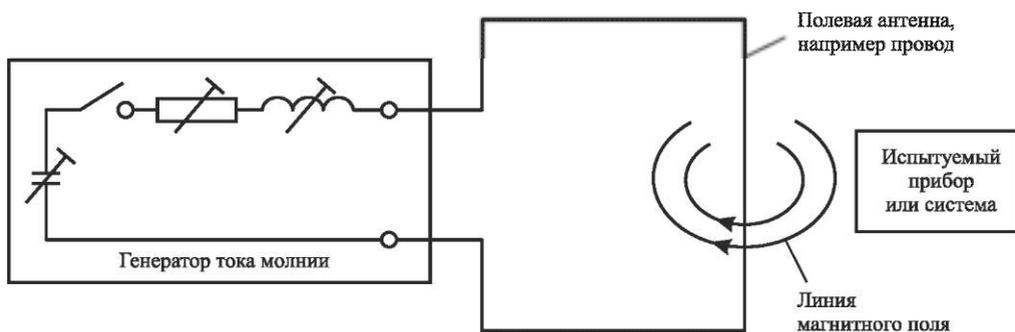
Рис. 4.37. Мероприятия по экранированию и оптимальной прокладке проводов

Фиктивное внутреннее сопротивление  $R_i$  дает отношение максимального напряжения при холостом ходе  $U_{\max}$  и тока короткого замыкания  $I_{\max}/R_i = U_{\max}/i_{\max}$ . Напряжение холостого хода испытательного генератора определяет электрическую прочность, или уровень испытательного напряжения прибора или системы.

Для определения устойчивости прибора или системы к полевым воздействиям в настоящее время, как правило, используют только граничные напряженности электрических и магнитных полей дискретных частот, например в Европейских нормах EN 50082-2: при 50 Гц – 30 А/м, при частотах от 26 до 1000 Гц – 10 В/м, при частоте 1,89 ГГц – 3 В/м. Устойчивость приборов и систем, в частности, к магнитным полям внутри строительных сооружений при прямых ударах молнии или при близких ударах в настоящее время не рассматривается.

Так как затухание в данном контексте внутри зданий и пространственных экранов в основном определяется проникновением внешнего поля через отверстия, то магнитное поле во всех зонах имеет принципиально одинаковое изменение во времени, определяемое спектром амплитудной плотности тока молнии.

В рамках поставленной задачи устойчивость определяется спектром амплитудной плотности тока молнии. Поэтому в настоящее время для типовых испытаний в лабораториях, например, используется генератор, изображенный на рис. 4.38. При этом приняты импульсы тока 10/350 мкс и 0,25/100 мкс, соответствующие току молнии при положительном заряде облака и повторному импульсу тока при отрицательном заряде. Генератор питает соответствующую полевую антенну, создающую магнитное поле, пропорциональное току. В это интенсивное поле могут быть помещены электронные приборы или системы. Так как в задачах защиты от молнии доминируют магнитные помехи, то, как правило, требуется доказать устойчивость только при воздействии магнитных полей.



**Рис. 4.38. Испытательное устройство для доказательства устойчивости к воздействию магнитного поля тока молнии**

Если устойчивость приборов и систем известна (как правило, для кондуктивных помех она гарантируется вторичной защитой входов, например, варисторами, ограничительными диодами или фильтрами, для полевых помех – установкой металлических кожухов), то требуются испытания в заданных защитных зонах. Цель испытаний установить:

- какие разрядники надо использовать для защиты проводов и вводов в зоны;
- обладают ли необходимым затуханием имеющиеся естественные фильтры, требуется ли улучшить экранирование, например, размещением решеток в отверстиях, окнах или, в крайних случаях, наклейкой металлической фольги.

**Требования к соединениям в местах перехода от зоны к зоне.** В соответствии с характеристиками электроприборов и при существующих нормах можно

сформулировать следующие условия обеспечения электромагнитной совместимости. Рассмотрим рис. 4.39. Провода, идущие из зоны  $0_A$ , обтекаются током молнии или его частью, характеризующегося первым импульсом  $S_1$  10/350 мкс, повторным импульсом  $S_2$  0,25/100 мкс и постоянной составляющей длительностью 0,5 с. Это относится в основном к местам пересечения с зонами  $0_A$  и  $1$  и к заземлениям в этих точках.

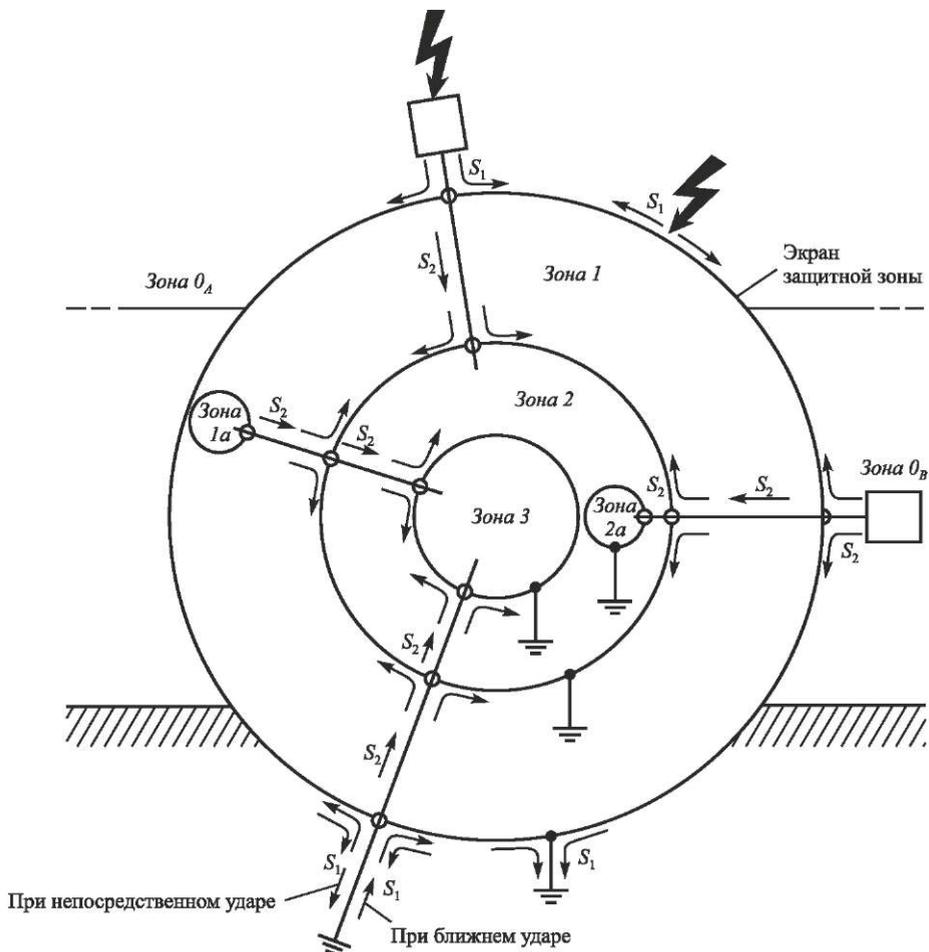


Рис. 4.39. Тип помех в проводах в различных защитных зонах

Наличие проводников в зоне  $1$ , идущих в последующие зоны, приводит к помехам в этих зонах, которые имеют меньшие значения, чем в зоне  $0_B$ . Индуцированное магнитным полем напряжения и обусловленные ими токи увеличивают остаточное магнитное поле в зоне  $1$ . Эти помехи в первом приближении можно представить при разомкнутых контурах импульсами напряжения 1,2/50 мкс и при коротком замыкании контуров импульсами тока 8/20 мкс. Кондуктивные помехи в зонах выше 1-й можно характеризовать аналогично, с учетом того, что максимальные значения помех снижены по сравнению с помехами в зоне  $1$ .

Спектр амплитудной плотности для защитных зон  $0_B$ ,  $1$  и других зон для импульсного тока 8/20 мкс, амплитудой 1 кА, приведен на рис. 4.40.

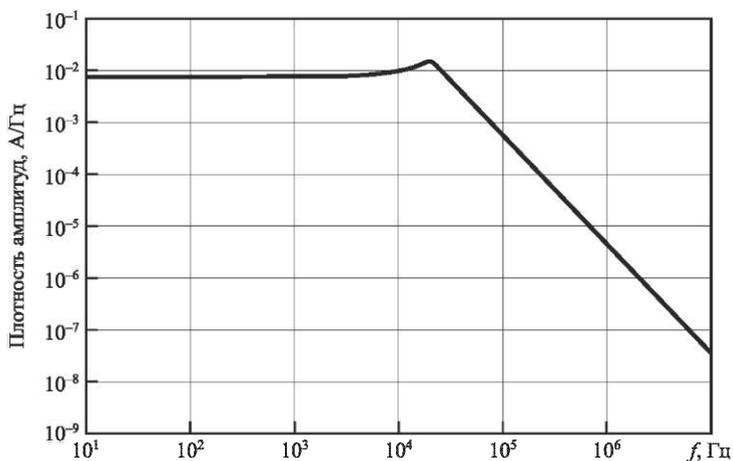


Рис. 4.40. Спектр амплитудной плотности импульсного тока 8/20 мкс амплитудой 1 кА

В зависимости от добротности экрана здания и пространственного экрана достигнимо демпфирование магнитного поля на несколько десятков децибел при каждом переходе из зоны в зону. Аналогичное затухание может быть достигнуто и в проводах, проходящих через границы зон, однако при этом необходимо учитывать помехи, которые могут создать элементы, устанавливаемые на проводах, на границах зон.

Для строительных конструкций, оснащенных электронным и радиотехническим оборудованием, не следует заниматься детальным анализом проникновения помех. Достаточно предположить, что экраны не имеют отверстий, они образованы сетками и смешанными системами уравнивания потенциалов, и при прямом ударе молнии в оборудование класса защиты I (см. МЭК-61024-1) имеют место типичные кондуктивные помехи (рис. 4.41). При этом предполагается, что 50% тока молнии отводится системой заземления, а 50% тока распределяется равномерно по зданию в зонах 0 и I и отводится к удаленным заземленным элементам по проводам при равномерном распределении по ним (кабели электропитания, провода связи, металлические коммуникации).

Помехи, возникшие в зоне  $\theta_B$  и в находящихся в ней системах, рассчитывают по электрическому и магнитному полям молнии.

Если не проводить точного анализа, то можно заменить помехи в каждом проводе импульсами напряжения 1,2/50 мкс (холостой ход) амплитудой 10 кВ и тока 8/20 мкс (короткое замыкание) амплитудой 5 кА.

Предполагается, что в зоне I каждый провод с активной и/или индуктивной связью с источниками подвергается воздействию напряжением 1,2/50 мкс амплитудой 6 кВ (при коротком замыкании – импульсом тока 8/20 мкс амплитудой 3 кА).

В остальных зонах воздействие ослаблено.

Разрядники на вводах проводов в зоны предназначены для того, чтобы величины помех не превышали указанных на рис. 4.41 значений. Электрическая прочность изоляции проводов и приборов подразделяется на синфазную и противофазную.

Нормирующие испытания защитных устройств гибридным генератором предпочтительно проводить по МЭК-61001-5. При этом прибор или система включаются по схеме, показанной на рис. 4.42. При холостом ходе возникает импульс напряжения

1,2/50 мкс, при коротком замыкании – импульс тока 8/20 мкс. Отношение  $U_{\max}/I_{\max}$  называется внутренним сопротивлением генератора; оно равно 2 Ом.

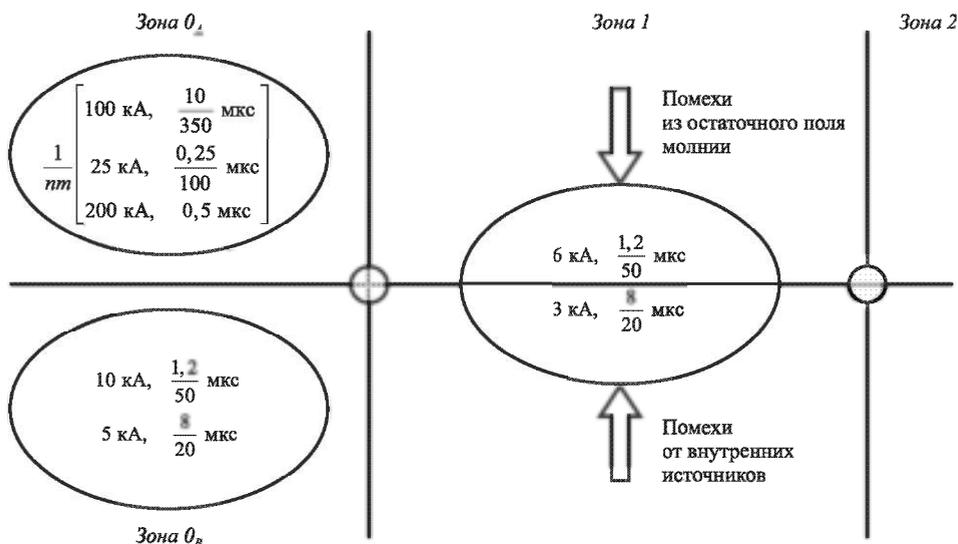


Рис. 4.41. Кондуктивные помехи в проводнике, находящемся в зонах  $\theta_A, \theta_B, I$

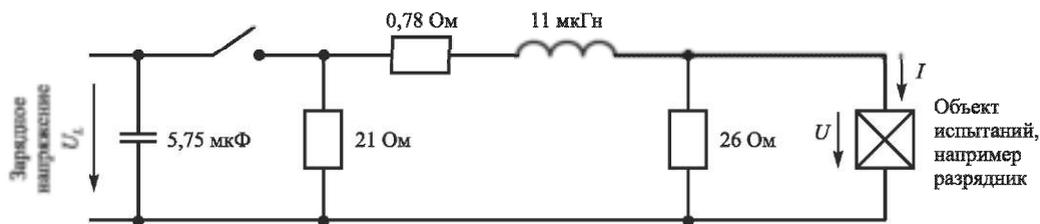


Рис. 4.42. Схема гибридного генератора с внутренним сопротивлением 2 Ом

В зависимости от жесткости испытаний, класса окружающей среды к прибору или системе прикладывают ступенчато увеличиваемые (этот вопрос является дискуссионным) синфазные напряжения. Прикладываемое к электронным входам испытываемого прибора напряжение холостого хода составляет 500–4000 В. В особом классе окружающей среды оно меняется от 500 В до 4 кВ, для входов электропитания – от 500 В до 6 кВ.

Прибор или система могут иметь гарантированную устойчивость или соответствующую импульсную электрическую прочность (при использовании световых каналов) или соответствующую импульсную токовую устойчивость (при использовании диодов, рассчитанных на большие токи). Так как входы прибора или системы имеют максимально допустимые напряжения (1,2/50 мкс) и токи (8/20 мкс), то на вводах проводов в зоны должны быть включены разрядники, гарантирующие, что допустимые воздействия не будут превышены.

Обусловленные молнией помехи в зонах  $\theta_B, I$  и выше могут быть воспроизведены гибридным генератором (см. рис. 4.42) при использовании разрядника, в указанных зонах может быть получено доказательство общей координации изоляции разрядника

и прибора или системы (более подробное описание гибридного генератора можно найти в работе [27]).

Испытать устройство или его часть с использованием гибридного генератора можно по схеме, изображенной на рис. 4.43, где согласующий сетевой элемент и схема связи выполнены в соответствии с индивидуальными требованиями и предписаниями.

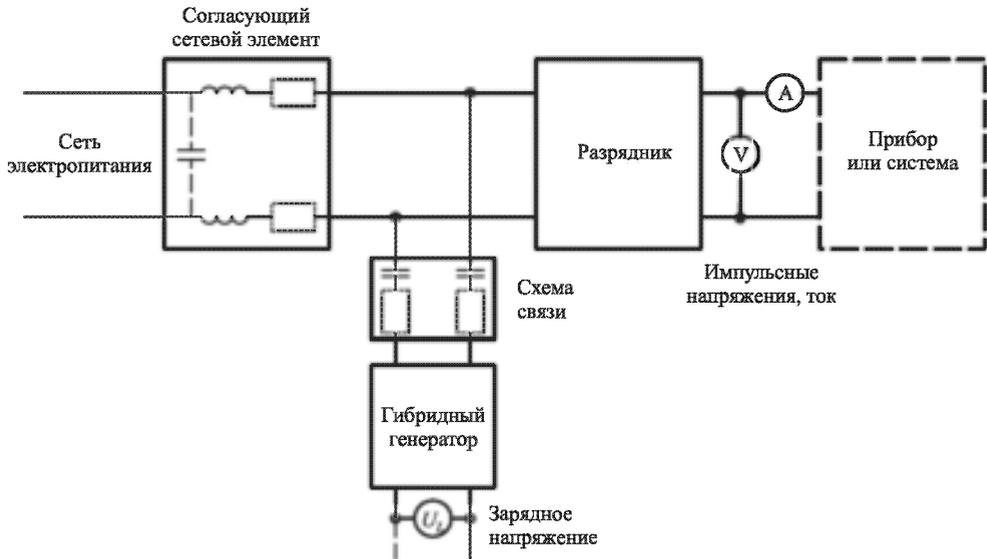


Рис. 4.43. Испытательная схема с гибридным генератором

При решении проблем молниезащиты особое внимание уделяется синфазным помехам, поскольку они являются доминирующими. Важной является проблема координации параметров разрядника и конечного прибора. Поэтому для реального воспроизведения грозовых помех при схеме испытаний (см. рис. 4.43) использована схема связи без ограничивающего ток сопротивления.

Для точек ввода проводов защитных зон 0 и 1 с присоединенными разрядниками базисными являются первый импульс тока молнии, повторный импульс и постоянная составляющая. Первый импульс и постоянная составляющая тока молнии могут быть воспроизведены генераторами со схемами (рис. 4.44–4.46) (подробнее об этом см. [27]).

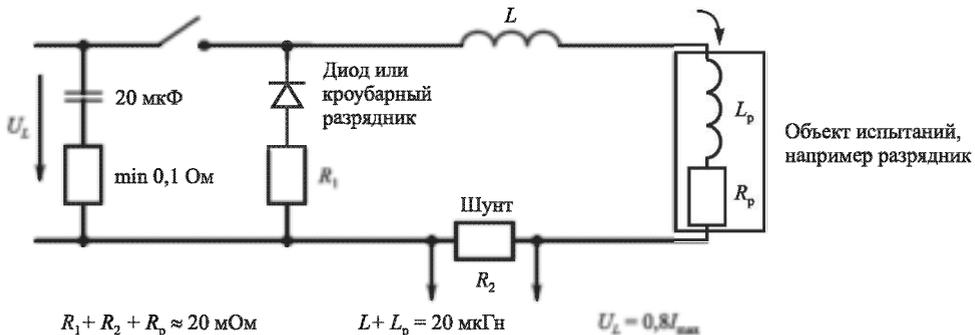


Рис. 4.44. Схема для создания энергоемких помех  $\chi/350 \text{ мкс}$

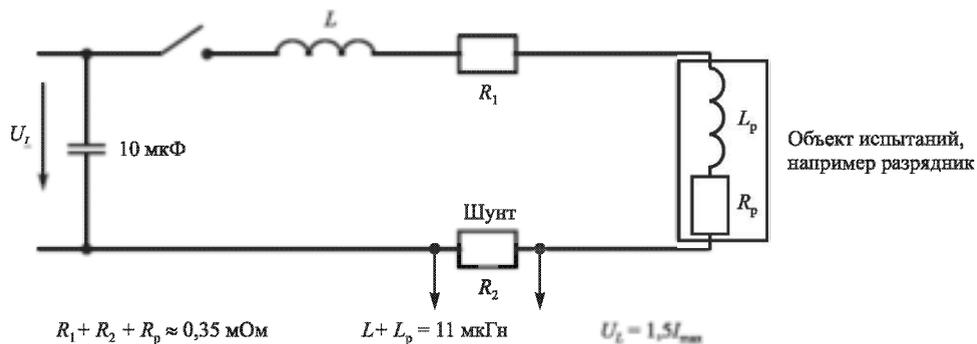


Рис. 4.45. Схема для получения крутизны на фронте  $10/\mu\text{с}$

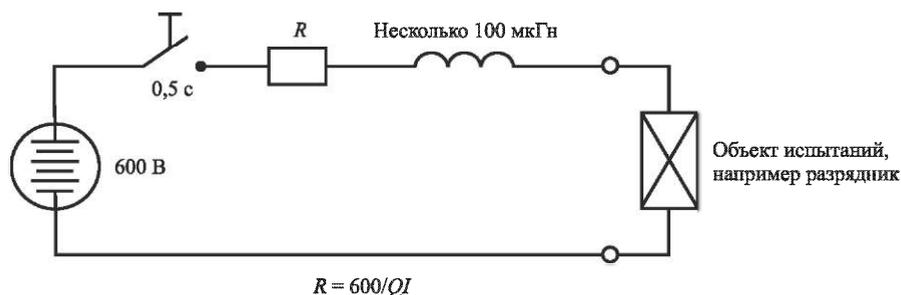


Рис. 4.46. Схема генератора для имитации постоянной составляющей тока молнии

Для выбора характеристик испытательных токов разрядника можно воспользоваться табл. 4.3. Принятая методика испытания – ступенчатое повышение напряжения: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 6,0; 10,0 кВ. В табл. 4.3  $n$  – число подходящих заземленных систем проводов,  $m$  – число проводов в системе.

Таблица 4.3

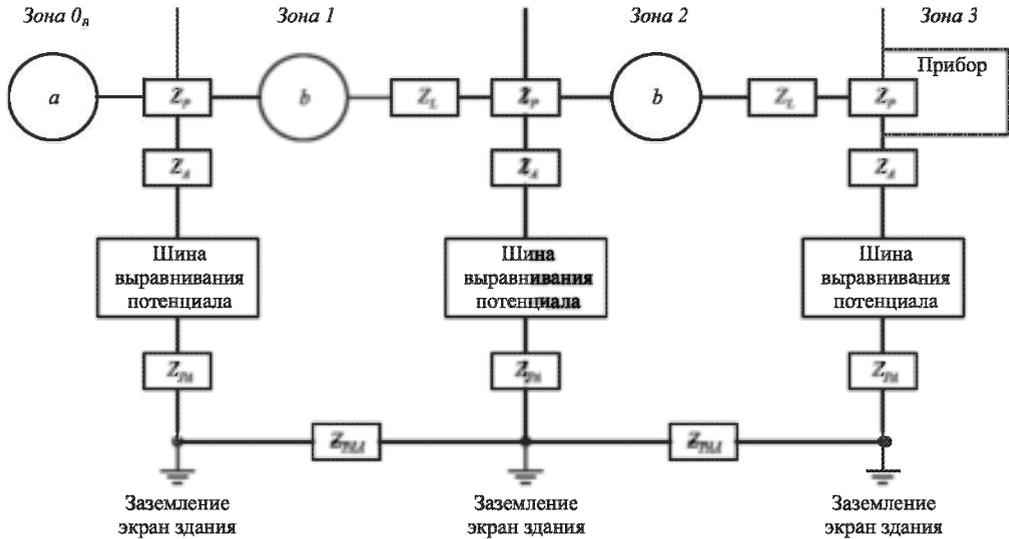
**Испытательные характеристики разрядников, предназначенных для подключения к проводам, пересекающим границы защитных зон**

Параметр	Границы защитных зон		
	$\theta_A/I$	$\theta_B/I$	$I/2$
Испытательные величины разрядников, установленных на проводах	$[1/(nm)] \cdot 100 \text{ кА}, 10/350 \text{ мкс}$ $[1/(nm)] \cdot 25 \text{ кА}, 0,25/100 \text{ мкс}$ $[1/(nm)] \cdot 200 \text{ А}, 0,5 \text{ с}$	Гибридная схема, 10 кВ	Гибридная схема, 6 кВ

По зонной концепции защиты от перенапряжений применяемые разрядники создают гальванически связанные системы, аналогичные показанной на рис. 4.47. Поэтому уровень разрядников устанавливается таким, чтобы скоординировать их со следующими разрядниками, с защищаемым прибором или системой, причем разрядники, включенные в сети электропитания, должны отключать токи короткого замыкания, протекающие через них.

Впрочем, следует обратить внимание, что полные сопротивления (см. рис. 4.47)  $Z_A$  (в основном определяемое длиной проводов, соединяющих разрядник),  $Z_{PA}$

(сопротивление провода, соединяющего шину уравнивания потенциалов на заземленном экране здания или помещения) и  $Z_{РАА}$  (определяемое шагом сетки системы уравнивания потенциалов и экранов здания, помещения) должны быть по возможности малы. Принципиально проектировщик свободен в выборе и координации параметров разрядников, приборов и систем, если он гарантирует, что помехи из защитных зон  $\theta$  и  $\theta_B$  ограничены до уровня устойчивости устройств, приборов и систем, установленных в зонах.



**Рис. 4.47. Схема замещения системы с разрядниками:**

$a$  – ток молнии из зоны  $\theta_A$  или индуцированная помеха из зоны  $\theta_B$ ;  $b$  – помехи из зоны  $\theta_B$ ;  $Z_p$  – полное сопротивление разрядника (нелинейное);  $Z_A$  – полное сопротивление провода, соединяющего разрядники;  $Z_L$  – полное сопротивление провода;  $Z_{РАА}$  – полное сопротивление шины уравнивания потенциалов и соединительного провода;  $Z_{РАА}$  – полное сопротивление сетчатой системы уравнивания потенциалов

При координированной замене разрядников по зонной концепции молниезащиты следует убедиться, что токи молнии, а также частичные токи в переходах зон  $\theta$  и 1 отводятся установленными разрядниками в виде импульсов, характерных для холостого хода 1,2/50 мкс или короткого замыкания 8/20 мкс. Этим требованиям удовлетворяют разрядники со скользящим разрядом и газонаполненные разрядники.

В настоящее время наблюдается тенденция использования в цепях электропитания варисторов на границе зон  $\theta_B$  и 1.

По описанию входных помех для разрядника и защищаемого прибора или системы и выдерживаемых напряжения холостого хода 1,2/50 мкс и тока короткого замыкания 8/20 мкс, предлагается характеризовать входной уровень разрядника напряжением 1,2/50 мкс (при разомкнутых выходных клеммах) и уровнем тока 8/20 мкс (при замкнутых выходных клеммах).

При наличии на выходе разрядника отклонения напряжения определяются действующие параметры  $U_{\max}$ ,  $\int u dt$ ,  $\int u^2 dt$  и  $U_{\max}/T_1$ , а также  $\int i dt$ ,  $\int i^2 dt$  и  $I_{\max}/T_1$ . Устанавливается, что эти параметры являются специфическими на выходе разрядника, характеризующими импульс напряжения 1,2/50 мкс или импульс тока 8/20 мкс. С помощью таких нормируемых выходных величин возможен координированный выбор разрядников и согласование их с защищаемым прибором или системой.

В табл. 4.4 приведены входные испытательные величины для координации параметров разрядников в сети электропитания и информационной сети.

Таблица 4.4

Типовые выходные величины разрядников

Параметр	Границы защитных зон	
	$\theta_A/l$ и $\theta_B/l$	$l/2$
Импульсное напряжение на выходе разрядника, кВ:		
сеть электропитания 400/230 В	4	1,5
информационная сеть	2	0,25
Ток разрядника, кА:		
сеть электропитания 400/230 В	2	0,75
информационная сеть	1	0,125

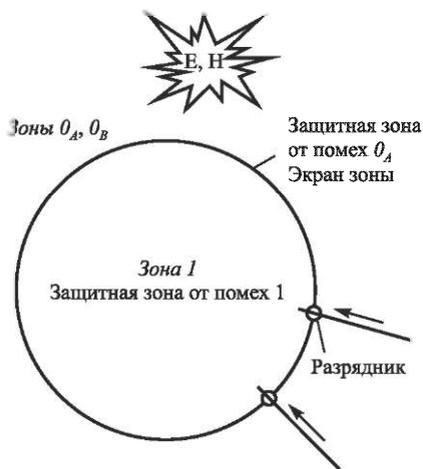


Рис. 4.48. Внешние источники помех

В табл. 4.4 представлены напряжения, соответствующие импульсам 1,2/50 мкс. Если используются другие параметры, то требуется доказать, что параметры  $U_{\max}$ ,  $\int u dt$ ,  $\int u^2 dt$  и  $U_{\max}/T_1$  меньше, чем для импульса 1,2/50 мкс. То же относится к импульсам тока. Требуется доказать, что  $I_{\max}$ ,  $\int i dt$ ,  $\int i^2 dt$  и  $I_{\max}/T_2$  меньше, чем соответствующие параметры для импульса 8/20 мкс.

Дальнейшие защитные зоны предназначены для защиты от источников помех, таких как высокочастотные передатчики, радары, электромагнитные импульсы ядерных взрывов, разряды статического электричества, особенно от электромагнитного импульса, возникающего при коммутации устройств большой мощности.

Для защиты от внешних помех, возникающих за пределами зоны 1 (рис. 4.48), как правило, проверяется граница между защитной зоной  $\theta$  или  $\theta_B$

и 1, на соответствие дополнительным требованиям и устанавливается, что:

- экран между зонами  $\theta$  или  $\theta_B$  и 1 достаточно демпфирует дополнительные поля;
- разрядник на границе зоны  $\theta$  или  $\theta_B$  и 1 ограничивает дополнительные кондуктивные помехи.

При необходимости создаются дополнительные защитные зоны, защищающие от помех названных источников.

Если за пределами зоны 1 существуют электромагнитные поля, характерные для зоны  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ , то внутри зоны 1 организуется дополнительная защитная зона 1 от этих помех. Границы зон и переходы при этом сохраняются, расширяются лишь требования к экрану и разряднику (особенно к фильтру) (см. рис. 4.1 и 4.2). В зависимости от обстоятельств можно обезопасить лишь определенную часть области, например, помещения, где имеются источники экстремальных помех и этого будет достаточно. Для этого могут быть созданы локальные защитные зоны.

От внутренних источников помех, например, коммутационных в распределительных устройствах, в которых происходят коммутации, обусловленные технологическими процессами, или процессы отключения (например, срабатывания предохранителей), можно защититься, выделив и ограничив зону  $\theta_B$  по принципу, показанному на рис. 4.2. При этом электромагнитное излучение от источника, определяемого как зона  $\theta_B$  (рис. 4.49), в достаточной мере демпфируется соответствующим экраном (помещения или прибора), а кондуктивные помехи в местах прохождения проводов через экраны снижаются. В пределах зоны 1 возникает зона  $\theta$  и т.д. Сохраняются границы зон и переходы из зоны в зону.

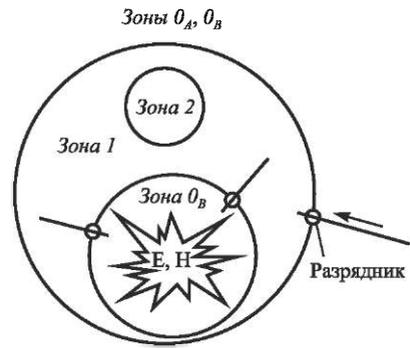


Рис. 4.49. Внутренние источники помех

Состояние техники при использовании концепции защитных зон позволяет планировать защитные мероприятия как при воздействии молнии, так и при коммутациях. Наряду с защитными зонами можно выделить зоны коммутаций. Соответствующие рекомендации можно найти в научно-технической литературе по данной тематике.

На примере зданий и сооружений проиллюстрируем использование зонной концепции.

Защищаемый объем, например, здание, в котором размещен щит управления электростанции, вычислительный центр или иное устройство, определяется как защитная зона 1 (рис. 4.50). Кроме зоны 1 выделяется зона  $\theta$ , в которой возможны непосредственные удары молнии и возникновение электромагнитного поля молнии.

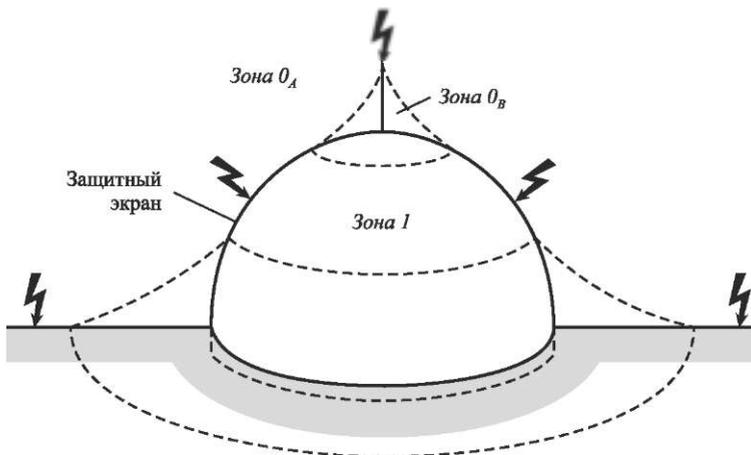


Рис. 4.50. Определение защитных зон  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  и 1

С помощью пространственного рассмотрения защитной области, в частности, методом катящейся сферы [27], в соответствии с выбранным классом защиты кроме зоны 1 можно установить зону  $\theta_B$ , в которой невозможны непосредственные удары, но существует оригинальное поле.

Зона 1 с электромагнитным экраном с отверстиями может быть образована, например, стальной арматурой здания, металлическими крышей и фасадом, в результате чего поле в зоне 1 существенно снижено по сравнению с зонами  $\theta_A$  и  $\theta_B$  (обычно на 20–50 дБ).

В земле зона 1 образована по возможности густой сеткой, внутренним плоским заземлителем, выполненным, например, в виде стальной арматуры пола в подвале (рис. 4.51). Следовательно, экран зоны 1 замкнут. Внутренний плоский заземлитель на периферии присоединяется к внешнему по возможности густой сеткой частично по эксплуатационным причинам, частично по условию снижения коррозии. При этом возникает смешанная система уравнивания потенциалов в зоне 1.

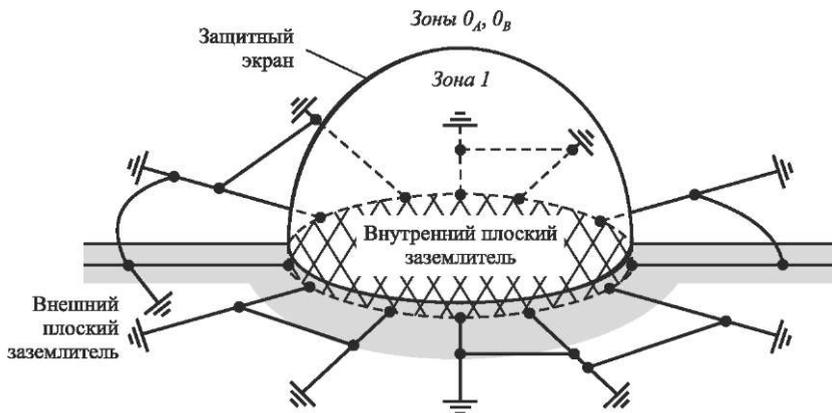


Рис. 4.51. Сетчатая система заземления

Все металлические детали и провода, идущие от зон  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  в зону 1, соединяются в местах прохода через экран зоны 1 зажимами или разрядниками.

Оборудование, выступающее над землей, и провода целесообразно объединить круговым проводом уравнивания потенциала, многократно объединенным с экраном зоны (рис. 4.52).

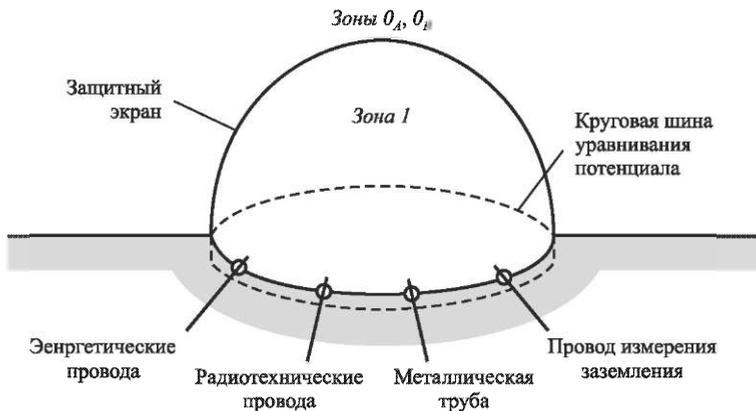
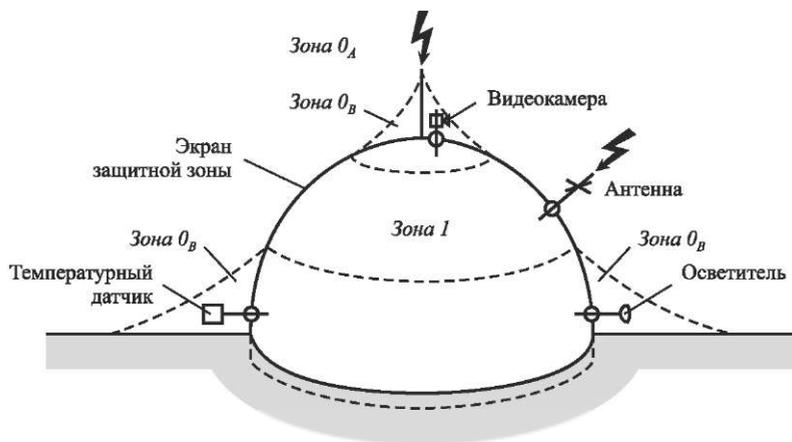


Рис. 4.52. Присоединение внешней системы электроснабжения на уровне земли на входе в зону 1

Вместо или для завершения круговой шины уравнивания потенциала можно использовать платы с вводами или локальные шины уравнивания потенциала, которые непосредственно через достаточно малое сопротивление связаны с экраном зоны, например с арматурой.

Соединительный элемент должен быть способен пропустить расчетный частичный ток молнии, который протекает по оборудованию и проводам, причем обычно ток, протекающий по заземлителю, как отмечалось ранее, составляет 50% общего тока, а остальной ток распределяется по проводам системы энергоснабжения. При этом предполагается, что частичный ток равномерно распределяется по проводам системы энергоснабжения.

Провода надземной периферии в зоне (местная шина уравнивания потенциалов), связывающие металлические предметы и экран зоны, должны быть замкнуты (рис. 4.53). Как правило, они связываются специальными приспособлениями так, что периферийные части устройства могут непосредственно поражаться молнией, и тогда соединительные детали и разрядники подвергаются воздействиям индуцированных помех.



**Рис. 4.53. Подключение внешних устройств, находящихся на поверхности здания, к защитной зоне 1**

В пределах зоны 1 могут быть сооружены дальнейшие зоны, например, для вычислительного зала или прибора, которые будут связаны с экраном защитной зоны (рис. 4.54). В зданиях, как правило, экран имеет отверстия за счет стальной арматуры или дверей, покрытых листовым материалом, а также экранированных окон. В этом случае также все металлические предметы и провода, подходящие к защитной зоне, соединяются с экраном или разрядником (рис. 4.55).

В дальнейших зонах целесообразно выделять локальные зоны, образованные, например, корпусами приборов (рис. 4.56). Провода между локальными зонами на границе каждой зоны необходимо подключать к экранам или к заземлению. Подключения должны выполняться и при прокладке внешнего заземляющего провода.

Для рассматриваемых здесь протяженных строительных сооружений, которые, как правило, имеют много точек подвода питания извне и многочисленные соединения в виде проводов между пространственно разделенными системами и приборами, наиболее эффективна смешанная система уравнивания потенциалов. Смешанная трехмерная структура системы уравнивания потенциалов в защищаемом объеме, которая

пронизывает данный объем и границы зон, является базой смешанного заземляющего устройства (рис. 4.57). Для реализации такой структуры необходимо более часто соединение всех металлических строительных компонентов и деталей, включая экраны защитных зон и корпуса приборов с заземляющим устройством и друг с другом. Подобное можно использовать для всех, электрических проводов и проводящих экранов, не несущих напряжение. Это относится и к таким устройствам, как дополнительные внешние экраны кабелей, защитные и заземляющие провода.

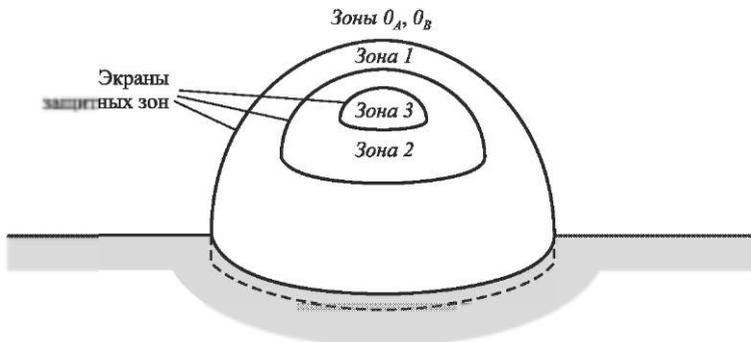


Рис. 4.54. Дальнейшие молниезащитные зоны

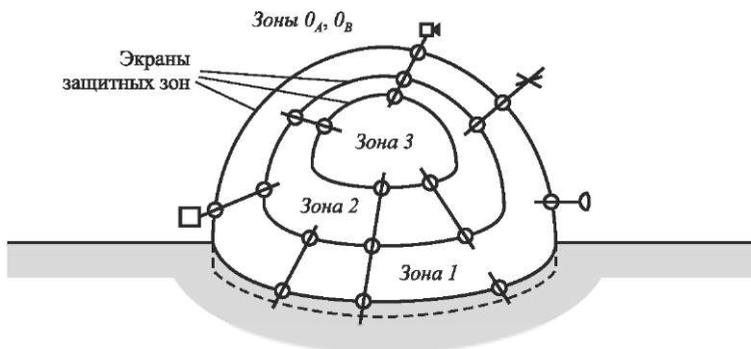


Рис. 4.55. Соединения внутренней системы коммуникаций при входе в защитные зоны

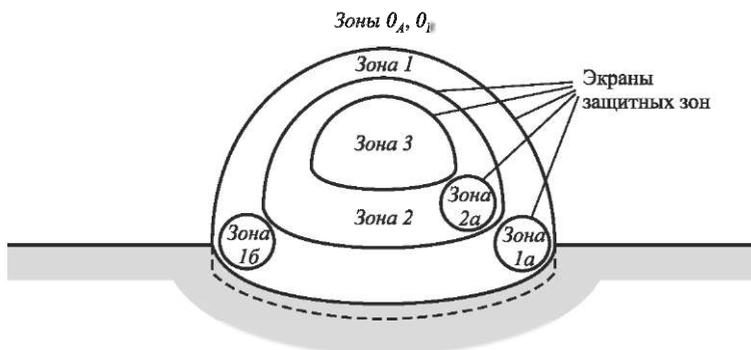


Рис. 4.56. Создание дальнейших локальных зон

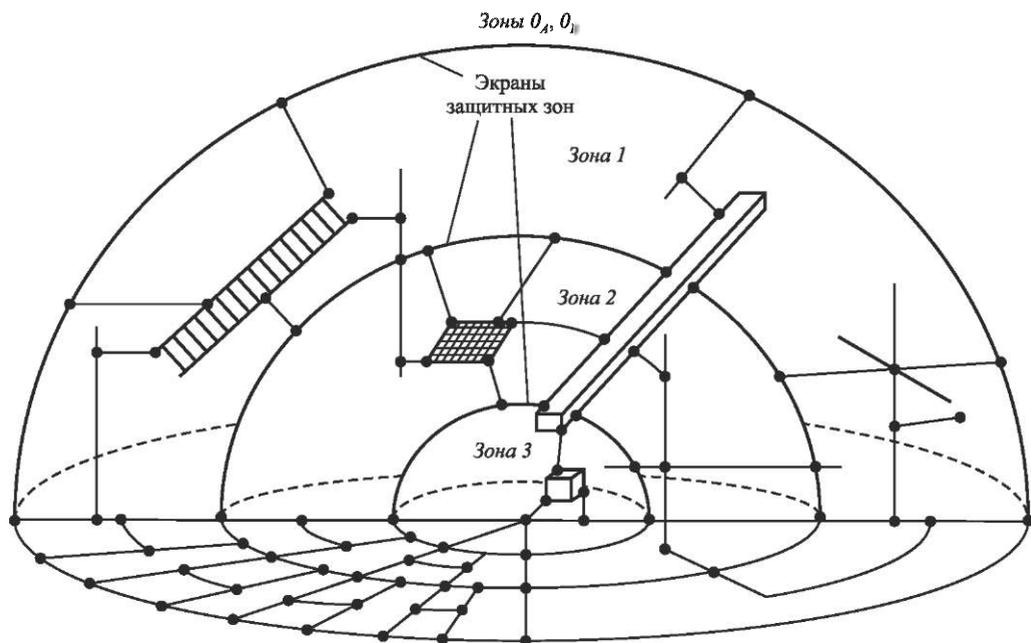


Рис. 4.57. Смешанное устройство уравнивания потенциалов

В такой системе минимизированы статические и переходные разности потенциалов за счет большого числа коротких параллельных малоиндуктивных соединений. Эта система имеет опорный потенциал для уравнивания потенциалов, и годится для подключения системы электропитания на границах зон.

Пространственно разделенные строительные конструкции, образующие защитные зоны, могут составлять единую молниезащитную замкнутую зону, если в них встроены проводящий экран, например, в форме металлической трубы или жестяного канала с достаточным затуханием и достаточно низким сопротивлением связи (см. рис. 4.34). Так можно во всем комплексе образовать *зону 1*. Однако следует иметь в виду, что по кабельным экранам могут протекать значительные частичные токи молнии, вызывающие высокие продольные напряжения.

Энергетические устройства и приборы в пределах защищенного объема могут создавать кондуктивные и полевые помехи. Если эти помехи в индивидуальной зоне превысят допустимый уровень, то их необходимо ограничить. Для этого источники помех следует соединять с экраном защитной зоны, например с металлическим корпусом (рис. 4.58). Эта зона называется *коммутационной защитной зоной* (КЗЗ). Экран снижает полевые помехи в защитной зоне. Кондуктивные помехи ограничиваются включением в коммутационной защитной зоне специальных устройств (в данном случае состоящих из варистора и фильтра).

Рассмотренная зонная концепция выбора структур по электромагнитной совместимости дает возможность осуществления требуемой молниезащиты и в очень протяженной строительной системе. Оптимальная структура защитных и коммутационных зон при проектировании системы молниезащиты имеет очень большое значение. При установлении молниезащитных и коммутационных зон определяются необходимые мероприятия по защите систем электропитания и телекоммуникаций, а также тип разрядников на границах зон.

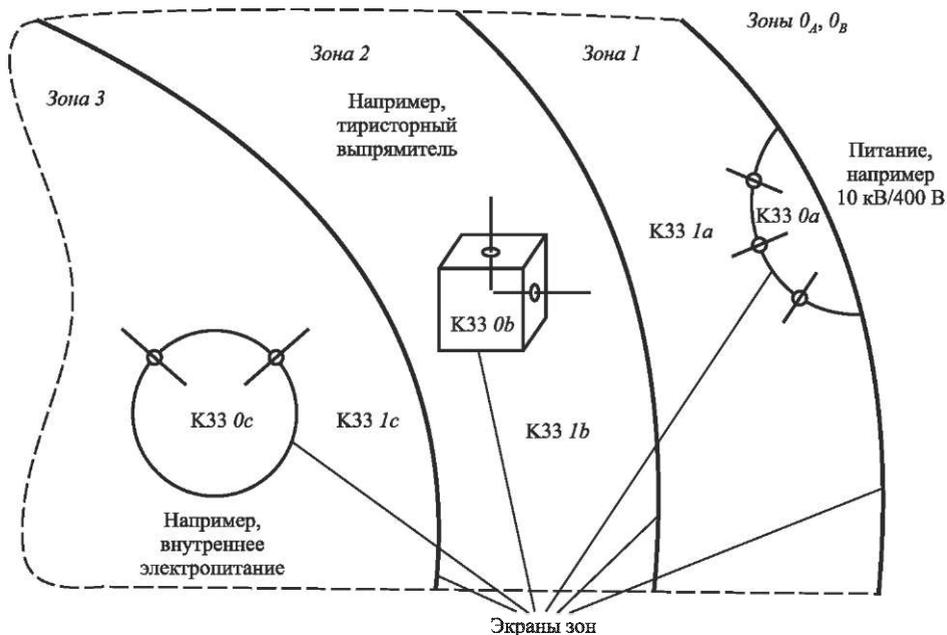


Рис. 4.58. Смешанное устройство уравнивания потенциалов

Молниезащита зданий с разветвленной телекоммуникационной системой является важной задачей. Борьба с помехами осложняется их широкополосным характером, а также вторичными факторами: наличием коммутационных перенапряжений, разрядами статического электричества, возможным электромагнитным импульсом ядерного взрыва.

Некоторые дополнительные сведения о зонной концепции ограничения перенапряжений можно найти в работах [28, 29].

### Вопросы для самопроверки

1. Объясните понятие «зонная концепция».
2. Как делится здание, сооружение на защитные зоны?
3. Чем отличаются зоны  $\theta_A$  и  $\theta_B$ ?
4. Чем отличаются электромагнитные условия на границах зон?
5. Может ли быть внутри зоны  $n$  зона  $n - 1$ ?
6. Экраны на границах зон.
7. Как выполняются границы зон?
8. Объясните, как выполняются электрические коммуникации на границах зон?
9. Какие требования предъявляют к соединительным проводникам на границах зон?
10. Как проводится уравнивание потенциалов в пределах зоны?
11. Как определяются зоны при изолированном от защищаемого сооружения грозозащитном устройстве?
12. Как распределяется ток молнии по коммуникациям при ударе в систему электроснабжения вблизи здания?
13. В чем заключаются мероприятия по ограничению помех в зоне  $\theta_B$ ?

## ГЛАВА 5

---

---

# ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И РАЗМЕЩЕНИЕ В НИХ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

---

---

### 5.1. Схемы сетей электроснабжения и электрические воздействия на них

Типовые схемы сетей электроснабжения различаются заземлением источника питания и электрического устройства. Обычно применяют следующие системы: *TN-C*; *TN-C-S*; *TN-S*; *TT*; *IT*.

Буквы означают:

- *1-я буква – режим нейтрали источника тока:*
  - *T* – непосредственное заземление нейтрали;
  - *I* – изолированная нейтраль;
- *2-я буква – состояние доступных проводящих частей относительно земли:*
  - *T* – корпус электрического устройства непосредственно заземлен;
  - *N* – корпус электрического устройства соединен с глухозаземленной нейтралью источника тока;
- *3-я буква – отношение между проводом нейтрали рабочего заземления *N* и проводом защитного заземления *PE* (только для *TN*-сети):*
  - *C-N*-провод и *PE*-провод прокладывается как *PEN*-провод (провод рабочего заземления, совмещенный с защитным проводом) от источника тока до электрического устройства;
  - *S-N*-провод и *PE*-провод прокладывают отдельно от источника тока до корпуса электрического устройства.

При *TN-C-S*-системе провода *N* и *PE* сначала прокладывают как единый *PEN*-провод от источника тока до электрического устройства и затем делят и прокладывают отдельно. После разделения обоих проводов их совместимость не разрешается. На рис. 5.1–5.4 представлены различные формы сети электроснабжения.

В зависимости от структуры сети по-разному решаются проблемы электромагнитной совместимости. В табл. 5.1 приведены различные схемы сетей с учетом электромагнитной совместимости.

Схему сети необходимо принимать во внимание при выборе и установке ограничителей перенапряжений и разрядников, уравнивающих потенциалы. В трехфазной сети в зависимости от формы необходимы три или четыре провода для ограничения продольных напряжений в главной части и в следующей части распределительной сети.

При двухпроводной системе, при питании переменным током два активных проводника дают возможность двумя или одним разрядником защитить сеть от продольных перенапряжений. Из-за принципиально одинакового подхода к защите двухпроводных линий далее рассматриваются защитные схемы только для трехфазной сети.

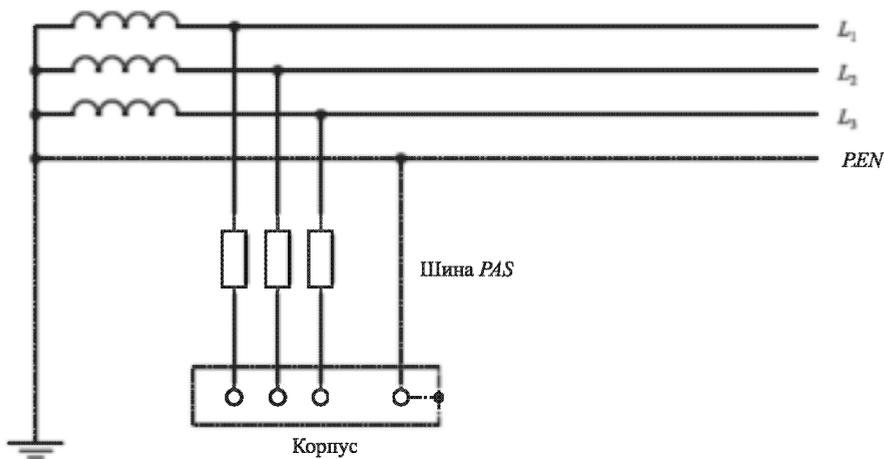


Рис. 5.1. *TN-C*-сеть: функции нейтрального (*N*) и защитного (*PE*) проводников выполняет один *PEN*-провод

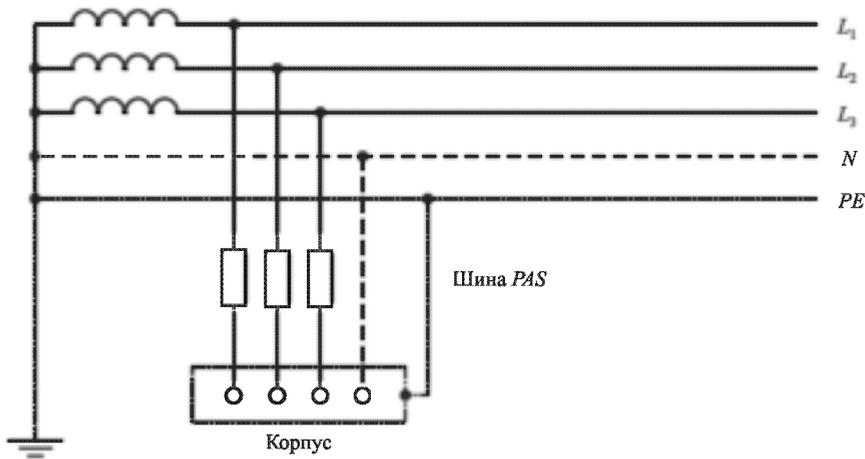
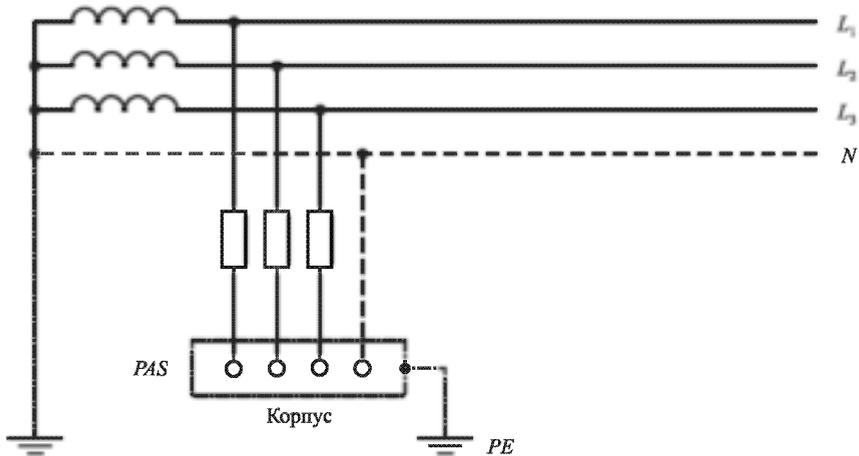


Рис. 5.2. *TN-S*-сеть: нейтральный (*N*) и защитный (*PE*) провода разделены в общей сети

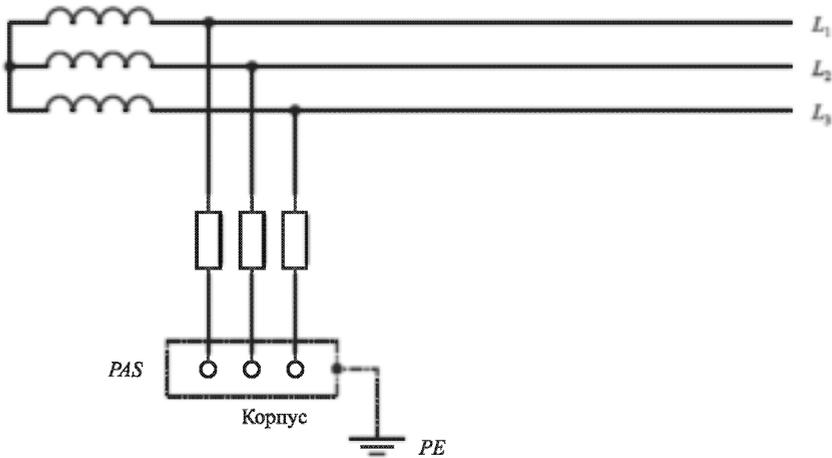
Сети электроснабжения разделяют на характерные участки с разными электромагнитными условиями (рис. 5.5):

- участок до выводов высокого напряжения трансформатора, имеющий, например, воздушную линию электропитания. На этом участке возможны прямые удары молнии. Этот участок принято обозначать *зоной 0*;
- участок от выводов низкого напряжения трансформатора до вводного устройства (панели), называемый главной распределительной сетью. На этом участке реализуются электромагнитные условия, соответствующие *зоне 1*;

- участки от вводного устройства до распределительных панелей. Эти участки принято называть местной распределительной сетью. Распределительная сеть имеет электромагнитные условия, характерные для *зоны 2*;
- участки от распределительных панелей до щитков электропитания, устанавливаемых в помещениях здания. Это – типичная *зона 3*;
- участок от щитков электропитания до конечного прибора (*зона 4*).



**Рис. 5.3. TT-сеть: одна точка заземлена непосредственно (рабочее заземление), корпус электрического устройства соединен с заземлителем отдельно от рабочего заземления**



**Рис. 5.4. IT-сеть: непосредственная связь между активными проводами отсутствует, корпус электрического устройства заземлен**

На границах зон устанавливают защитные устройства. Защитные устройства со сложными схемами могут иметь различные входные и выходные характеристики. Итак, электромагнитные условия зон на границе могут различаться. Иногда на границах зон выделяют ступени защиты. Ступень защиты, устанавливаемую на границе зон 0/1, обозначают степенью IV, на границе зон 1/2 – степенью III, на границе зон 2/3 – степенью II, на границе зон 3/4 – степенью I.

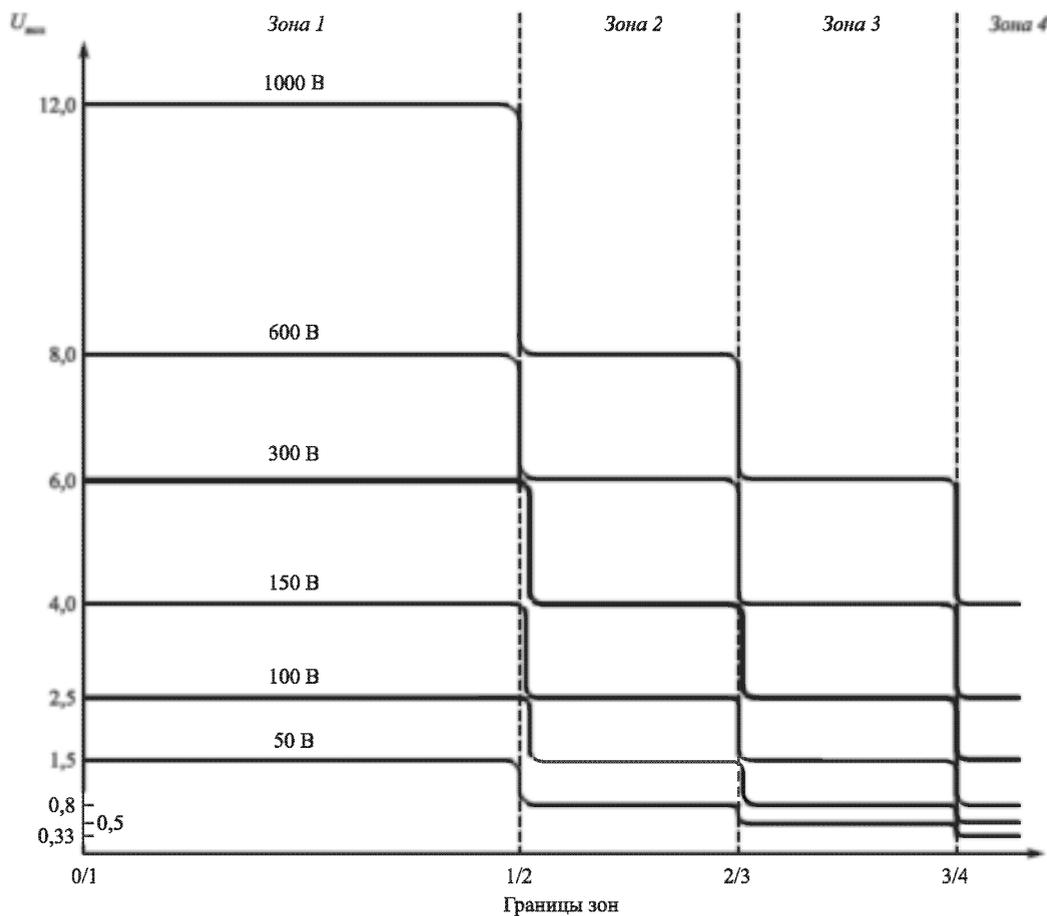
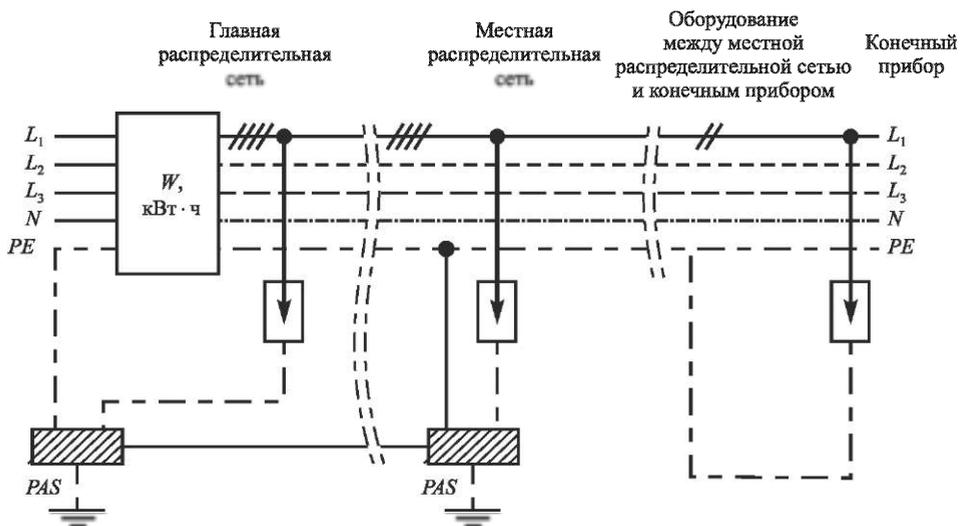


Рис. 5.5. Испытательные импульсные напряжения (1,2/50 мкс) оборудования, расположенного в защитных зонах 1–4 сети электроснабжения

**Различные схемы сетей электроснабжения  
с учетом электромагнитной совместимости**

№ п/п	Схема распределительной сети, питающей здание	Схема сети в здании	Рекомендации по обеспечению ЭМС
1	<i>TN-S</i>	<i>TN-S</i>	Наиболее благоприятная сеть для обеспечения ЭМС
2	<i>TN-C</i>	<i>TN-S</i>	Сохранить <i>TN-S</i> -сеть не только в здании, но и между этажами и на этажах
3	<i>TN-C</i>	<i>TN-C</i>	Не сохранять в здании <i>TN-C</i> -сеть из-за большой несимметрии токов
4	<i>TN-C</i>	<i>TN-C-S</i>	Не использовать <i>TN-C-S</i> -сеть в здании из-за большой несимметрии токов
5	<i>TN-C</i>	<i>TN-C</i>	Сохранить <i>TN-C</i> -сеть в подвале
6	<i>TT</i>	<i>TT</i>	Учитывать ЭМС информационно-технических устройств в пределах одного здания, но не учитывать ЭМС в соединениях между зданиями с информационно-техническими устройствами. Требуется разгрузочный провод
7	<i>TT</i>	Разделительный трансформатор для создания <i>TN-S</i> -сети	Благоприятное решение для ЭМС
8	<i>IT</i>	<i>IT</i>	В России схема обычно не применяется. В настоящее время используется в Норвегии. Справедлива рекомендация, относящаяся к п. 7
9	<i>IT</i>	Разделительный трансформатор для создания <i>TN-S</i> -сети	Благоприятное решение для ЭМС

Сеть электроснабжения может содержать четыре ступени ограничения перенапряжений. Все оборудование, расположенное в зонах между ступенями защиты, может подвергаться различным электромагнитным воздействиям.

Остановимся на воздействиях импульсных грозовых напряжений. Электрическая прочность изоляции и нормальное функционирование оборудования, установленного в зонах, должны быть обеспечены при уровнях воздействий, меньших, чем испытательные напряжения.

Международной электротехнической комиссией установлены испытательные напряжения в зависимости от зоны и номинального напряжения оборудования (классы напряжений указаны в столбце «Зона 1»). На рис. 5.5 приведены эти зависимости применительно к сетям электроснабжения разных классов напряжения в диапазоне от 50 В до 1 кВ. Для сети электропитания 220 В (максимальное напряжение составляет примерно 300 В, выделено на рис. 5.5 жирной линией). Испытательное напряжение для оборудования, установленного в зоне 1, составляет 6 кВ, в зоне 2 – 4 кВ, в зоне 3 – 2,5 кВ, и в зоне 4 – 1,5 кВ.

**Схема защиты от перенапряжений в  $TN-C$ -сети.** При  $TN-C$ -схеме в главной и местной частях трехфазной сети для продольной защиты от перенапряжений требуются три разрядника. Эти разрядники устанавливают между фазными проводами и заземленной системой уравнивания потенциалов. При таком включении разрядников требуется также прямое соединение  $PEN$ -провода и системы уравнивания потенциалов.

Разрядники при напряжении 230/400 В, применяемые для защиты приборов от поперечных и продольных перенапряжений, по своим характеристикам такие же, как и разрядники, применяемые в  $TN-S$ -сети. Провод  $PEN$  присоединяется к клемме «N».

Включение разрядников в  $TN-C$ -сети показано на рис. 5.6.

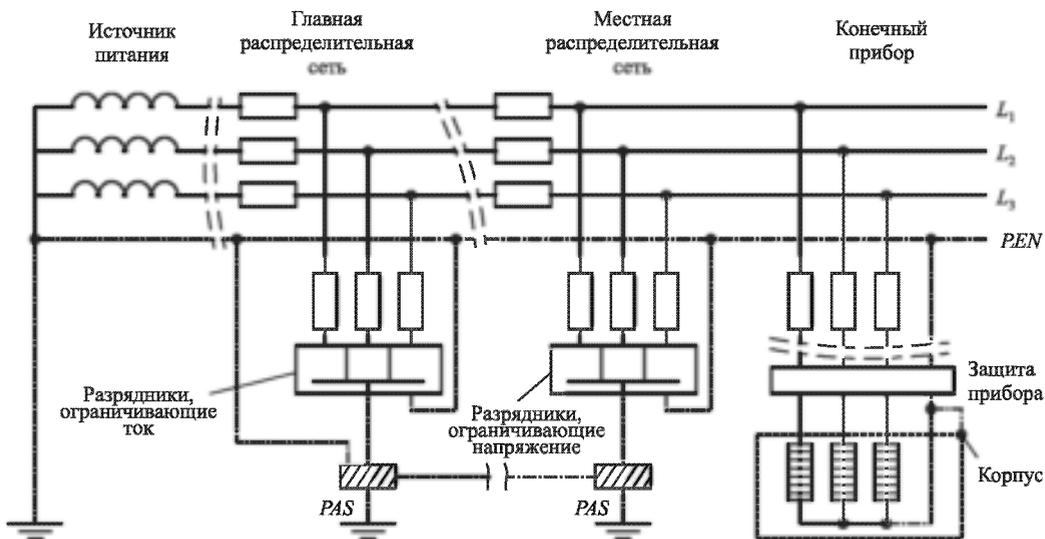


Рис. 5.6. Установка разрядников в  $TN-C$ -сети

**Схема защиты от перенапряжений в  $TN-S$ -сети.** В  $TN-S$ -сети провода  $N$  и  $PE$  прокладываются отдельно, поэтому возможно появление высокой разности потенциалов между ними.

Следовательно, необходимо включать разрядники как между  $L$ -проводами и  $PE$ -проводом, так и между  $N$ - и  $PE$ -проводами. При этом  $N$ -провод следует рассматривать как активный провод. При питании переменным током в  $TN-S$ -сети в качестве продольной защиты от перенапряжений как в главной, так и в местной распределительных сетях, необходимы четыре разрядника.

В  $TN-C-S$ -сети должен быть однократный контакт между  $PEN$ -проводом и системой уравнивания потенциалов здания непосредственно в месте установки разрядника главной распределительной сети, т.е. в точке питания здания. В этом случае требуется только три разрядника.

Схема расстановки разрядников в  $TN-S$ -сети приведена на рис. 5.7.

**Схема защиты от перенапряжений в  $TT$ -сети.** В  $TT$ -сети в распоряжении потребителя четыре провода:  $L_1, L_2, L_3$  и  $N$ -без дополнительного  $PE$ -провода. В такой сети обычно устанавливают устройство защиты от тока утечки на землю (УЗО) для предотвращения опасных напряжений прикосновения (рис. 5.8). Для предотвращения повреждения или залипания контактов выключателя УЗО, а также для защиты от срабатывания при перегрузке на вводе питающих проводов в здании необходимо устанавливать плавкие вставки (предохранители).

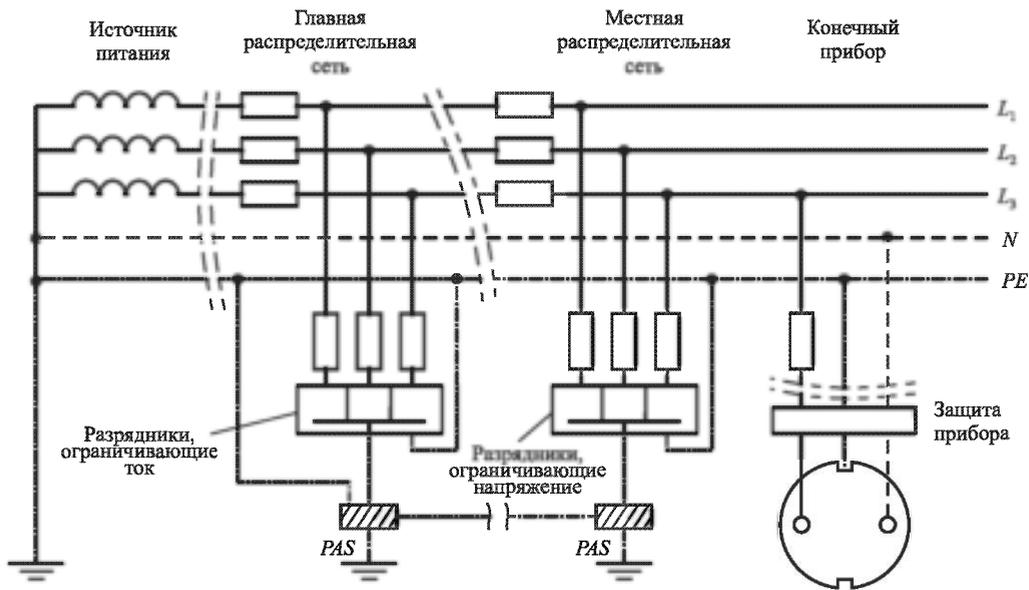


Рис. 5.7. Установка разрядников в TN-S-сети

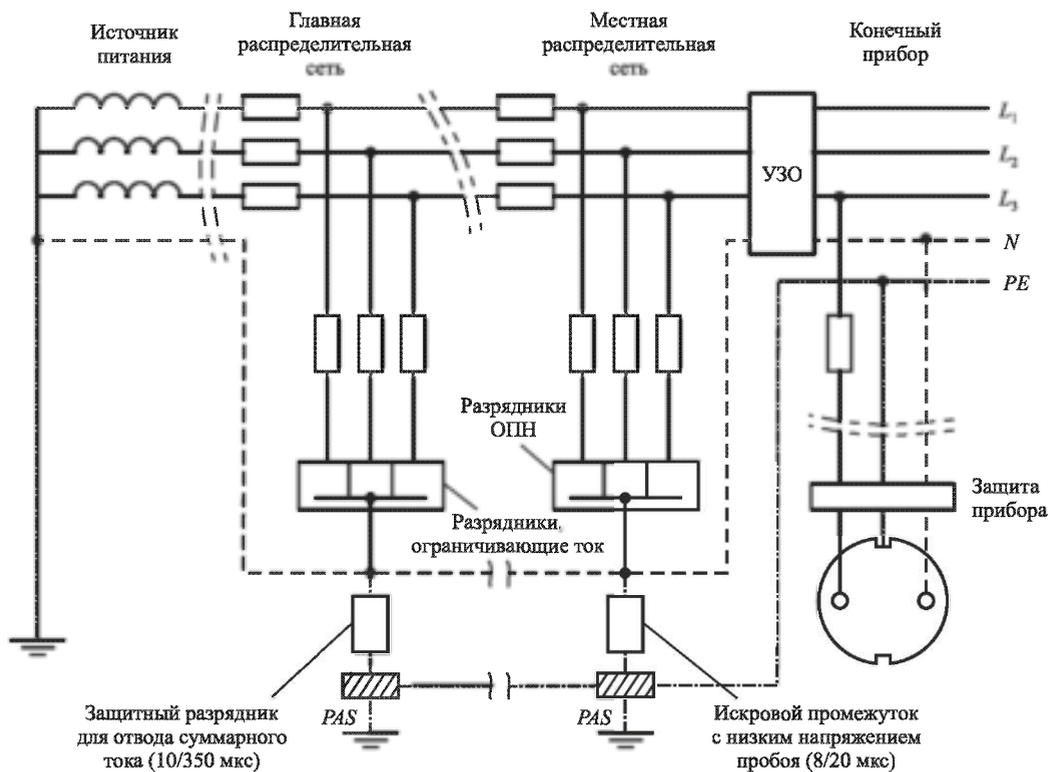


Рис. 5.8. TT-сеть с защитным устройством УЗО

Вследствие старения варисторов и увеличения ожидаемых токов утечки с активных проводов на землю для предотвращения опасных напряжений прикосновения достаточно искрового разрядника. В схеме сети с варистором потребовалось бы применение разделительного выключателя. Известно, что такие выключатели в состоянии пропускать токи 8/20 мкс, но не импульсы тока молнии.

Искровые разрядники включают между проводом, имеющимся у источника питания, и системой уравнивания потенциалов здания. Они защищают также кабель и провода в пределах здания от разрушительного воздействия слишком высоких напряжений, возникающих за счет связи с контуром тока молнии. Нарушение изоляции привело бы к очень высоким напряжениям прикосновения.

Очень высокие напряжения прикосновения появились бы и при возникновении искрового разряда между проводами  $L$  и  $PE$  при коротком замыкании. Энергия, которая разрушает разрядник, работающий по принципу искрового разряда, много больше той, которая может повредить изоляцию кабеля. В настоящее время разрабатываются защитные схемы с повышенной надежностью для опасных напряжений прикосновения.

Обсуждается предложение включать разрядник не между входящими в здание проводами и системой уравнивания потенциалов здания, а между тремя проводами  $L$  и нейтральным проводом  $N$  (см. рис. 5.8). В этом случае между  $N$ -проводом и системой уравнивания потенциалов устанавливается мощный искровой разрядник, способный пропустить суммарный импульсный ток. Если ожидается импульсный наведенный ток, то разрядник в  $N$ -проводе должен быть искровым.

В местной сети между  $L$ -проводами и нейтральным проводом  $N$  должны быть включены варисторы; между  $N$  и системой уравнивания потенциалов  $PAS$  требуется включение искрового разрядника.

Из-за незначительной электрической прочности подключенных приборов и устройств этот разрядник должен иметь напряжение пробоя меньше, чем грозовой разрядник, установленный в сети питания. В сети 230 В оно должно быть равно 1,5–2 кВ. В этом случае УЗО функционально защищает установку от опасных напряжений прикосновения.

**Схема защиты от перенапряжений в ИТ-сети.** Защита от опасных напряжений прикосновения может быть использована и в ИТ-сети. В этом случае потребитель имеет в распоряжении три провода:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ . Сам источник питания не связан непосредственно с потенциалом земли, т.е. изолирован. С помощью устройства контроля изоляции потребитель может непрерывно контролировать изоляцию трех активных проводов и устройства в целом относительно потенциала земли.

Токовые разрядники и ограничители перенапряжений могут устанавливаться как в главной распределительной сети, например, питающей здание, так и в местных распределительных сетях. Они включаются между активными проводами  $L_1$ – $L_3$  и заземленной системой уравнивания потенциалов здания. Для защиты от перенапряжений в ИТ-сети устанавливается также дополнительная защита входных цепей приборов. Схема этой защиты приведена на рис. 5.9, разрядники подключаются к активным проводам и к  $PE$ -проводу.

При выборе разрядника необходимо учитывать возможные в будущем присоединения к заземлению в системе. Чтобы предотвратить термические перегрузки при таких присоединениях варисторов, разрядники необходимо рассчитывать на статические разрядные напряжения, возникающие при однофазных замыканиях на землю. Так, в трехфазной ИТ-сети 380 В нужно использовать разрядник с номинальным напряжением 500 В.

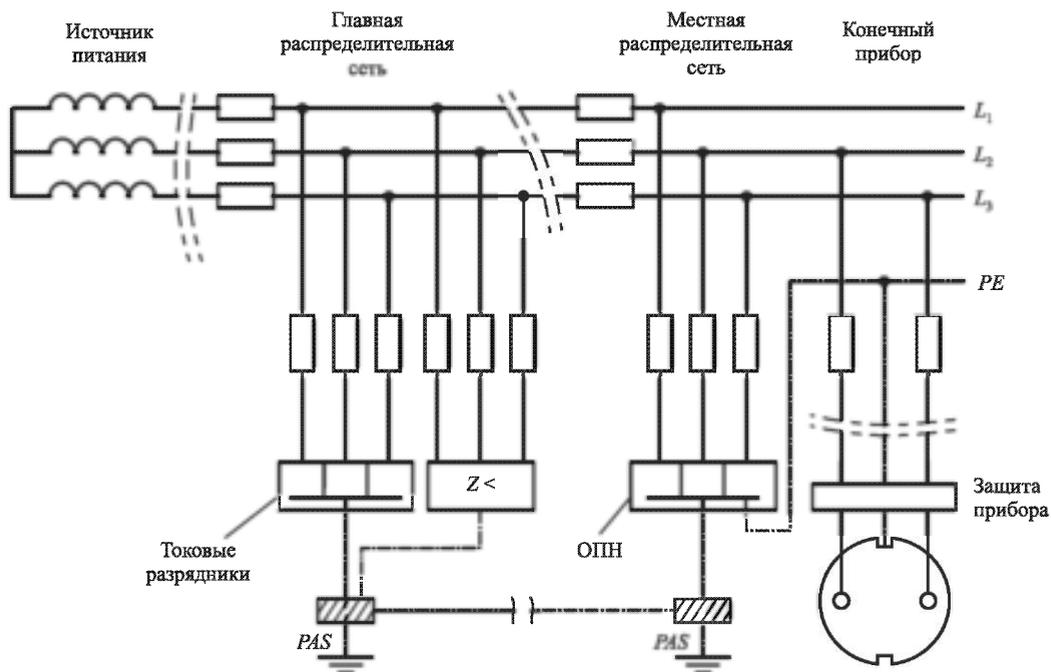


Рис. 5.9. Установка разрядников в ИТ-сети

Различные производители в своих каталогах предлагают ограничители перенапряжений специально для ИТ-сетей.

Устройство защитного отключения при соответствующей установке разрядника, ограничивающего перенапряжения, должно быть отрегулировано на такое значение тока утечки, чтобы не реагировать на физически обусловленные токи утечки варистора.

**Совместная работа с УЗО.** Чтобы предотвратить возникновение опасного напряжения прикосновения, в сетях различной конфигурации устанавливается разный ток утечки, на который реагирует УЗО. В местной распределительной сети необходима настройка УЗО по току утечки разрядников, ограничивающих перенапряжения. Благодаря тому, что импульсный ток перед УЗО стекает на землю через систему уравнивания потенциалов и УЗО защищено от воздействия импульсного тока. Дефекты, такие как сваривание контактов, в УЗО не возникают. Кроме того, чувствительное УЗО не подвергается воздействию импульсного тока и не срабатывает, т.е. не отключает питание. Этим достигается высокая работоспособность устройства.

Установка УЗО перед варистором в местной распределительной сети целесообразна потому, что УЗО контролирует токи утечки, протекающие через варистор и систему выравнивания потенциалов. Обычно в цепи варистора устанавливается предохранитель. Вследствие токов утечки варистор может быть нагрет. Если варистор слишком нагрет, то он отделяется от сети с помощью специального теплового распейтеля. Дополнительный контроль с помощью УЗО не требуется. Однако ни в коем случае контроль токов утечки в разряднике не следует возлагать на выключатель УЗО.

Современные УЗО устойчивы к току. На рынке имеются УЗО, стойкие к току величиной во многие сотни ампер, а также несколько килоампер (8/20 мкс), при которых они не срабатывают. В схемах с ограничителями перенапряжений должны использоваться УЗО, стойкие к воздействиям токов.

Схема с современной установкой элементов для питания током устройств с разрядником и УЗО представлена на рис. 5.10. Три провода  $L_1-L_3$ , нейтральный провод и четыре ограничителя перенапряжений объединяются в мостовую схему, с одной стороны связанную с землей. К заземленной точке подходит провод уравнивания потенциалов. Четырехзвенный мост образует источник питания варисторов и четырехполюсного УЗО, которое включено после варисторов.

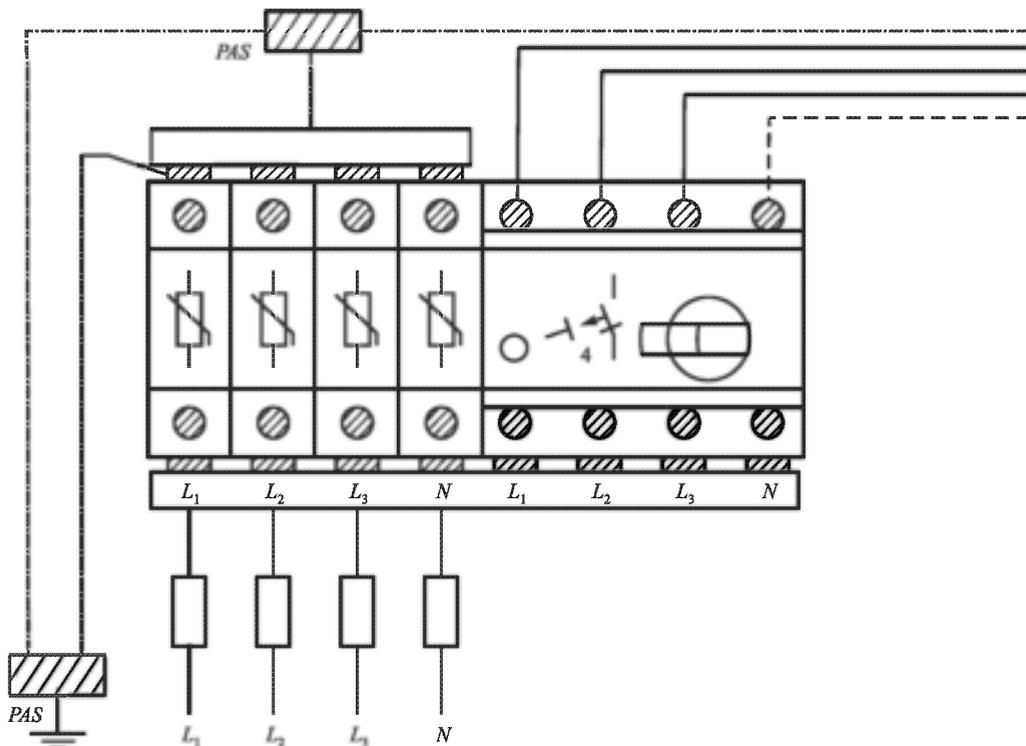


Рис. 5.10. Мостовая схема с четырьмя варисторами и УЗО

**Заземление разрядников и защищаемого устройства.** Изготовители разрядников дают технические параметры варисторов для распределительных сетей, а также значения остающихся напряжений на варисторах при установленных токовых воздействиях. Было бы желательно, чтобы эти токи совпадали с номинальным током варистора.

В действительности ожидаемое остающееся напряжение зависит не только от типа варистора, но и от места его установки в электрической сети, а также от выполнения заземления защищаемого объема (защищаемого устройства) и варистора. Токковый разрядник и варистор включаются обычно в распределительной сети электроснабжения между активным проводом  $L$  или нейтральным проводом  $N$  и заземленной системой уравнивания потенциалов.

Провод  $L$ , по которому протекают токи переходных процессов, подсоединен к проводнику, идущему к варистору (рис. 5.11). Второй провод идет от разрядника к шине уравнивания потенциалов PAS. Эти провода имеют индуктивные сопротивления. При протекании тока при переходном процессе в цепи тока возникает дополнительное напряжение

$$U_{z1} = L_{a1} \frac{di}{dt} + R_{a1} i_{\max}.$$

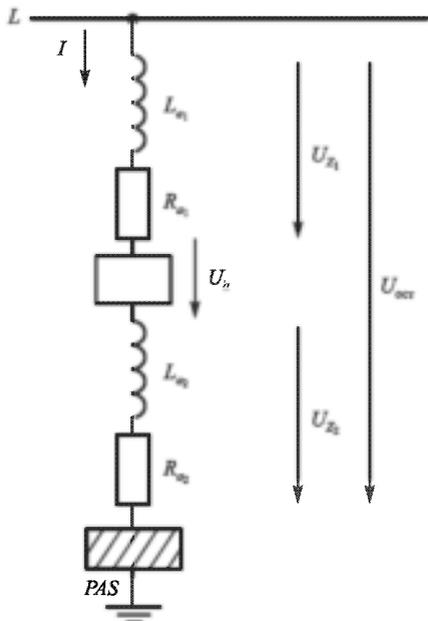


Рис. 5.11. Возникновение дополнительного напряжения

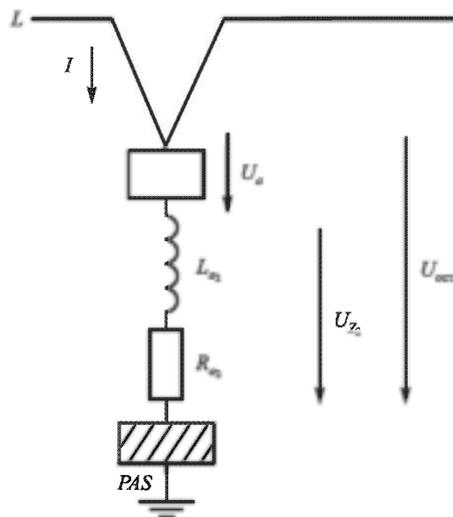


Рис. 5.12. Возникновение дополнительного напряжения  $U_{z_2}$

В цепи со вторым проводом создается напряжение

$$U_{z_2} = L_{a_2} \frac{di}{dt} + R_{a_2} i_{\max}.$$

При сложении этих напряжений определяется указываемое изготовителем остающееся напряжение

$$U_{\text{ост}} = U_a + U_{z_1} + U_{z_2}.$$

Для варистора с номинальным током (8/20 мкс), равным 15 кА, вместе с двумя соединительными проводами из меди длиной по 1 м общее напряжение  $U_{\text{ост}}$  составило бы 5,5 кВ при  $U_a \leq 1,5$  кВ.

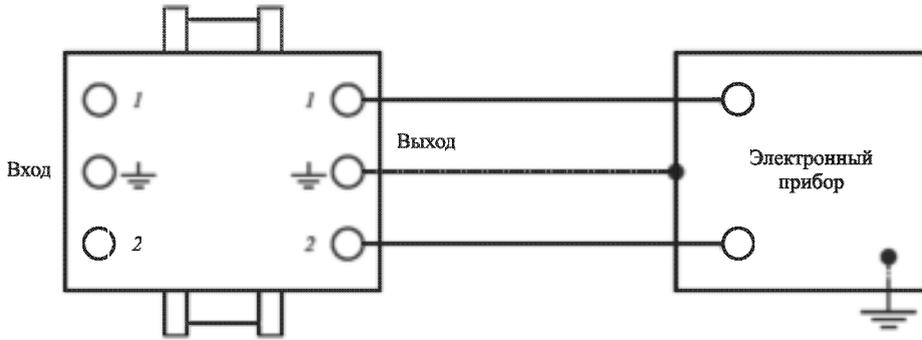
При таких условиях влияние активного сопротивления проводов в остающееся напряжение пренебрежимо мало.

Расчет возникающего при установке разрядника остающегося напряжения еще раз подтверждает высказанную ранее мысль, что токовый разрядник, вследствие высокой амплитуды тока молнии, имеет недостаток – большое остающееся напряжение. Поэтому защита от перенапряжений при высоких амплитудах отводимого через разрядник тока и малых временах фронта всегда должна быть, по крайней мере, двухступенчатой.

Снижение дополнительного напряжения можно достигнуть расщеплением провода, идущего к разряднику (рис. 5.12). При таком выполнении подключения при пренебрежении активными сопротивлениями проводов, на остающееся напряжение влияет индуктивность  $L_{a_2}$  и возникает дополнительное напряжение  $U_{z_2}$ .

Дополнительное напряжение также возникает, если ограничитель перенапряжений соединяется с заземленной точкой системы уравнивания потенциалов защищаемого объекта (электронного прибора). Так как переходный ток ограничителя через

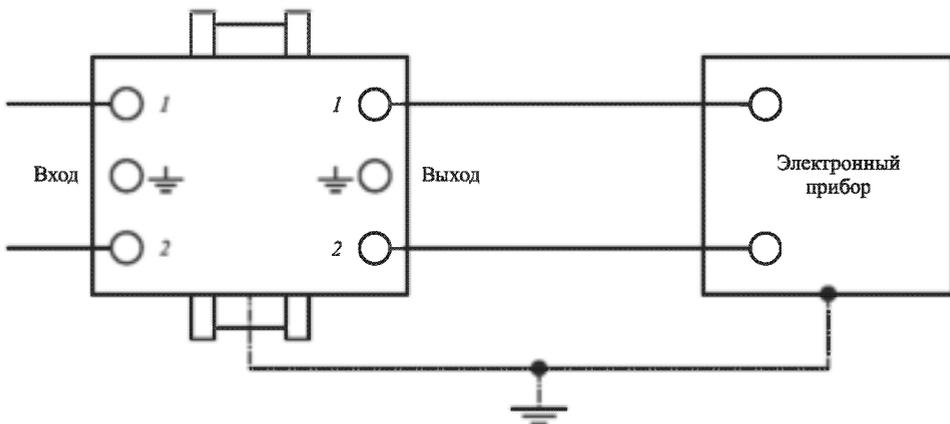
заземляющий провод проходит сначала через шину  $PE$  электронного прибора и затем уходит на землю, то перенапряжение между активными проводами и  $PE$ -потенциалом электронного прибора прямо зависит от расстояния между разрядником и защищаемым объектом (рис. 5.13). С каждым удвоением этого расстояния также удваивается значение перенапряжения. Защитное действие варистора становится частичным или совсем утрачивается.



**Рис. 5.13. Неверно выполненное заземление защиты от перенапряжений и защищаемого электронного прибора**

Дополнительное напряжение также возникает, если разрядник и защищаемый электронный прибор отдельно заземлены с общей точкой заземления (рис. 5.14). Перенапряжение между тремя активными проводами и  $PE$ -потенциалом электронного прибора зависит в этом случае от расстояния между опорной точкой разрядника и общей точкой. Здесь также удвоение длины проводов между опорной точкой разрядника и общей точкой дает примерно удвоение перенапряжения. Потенциал, возникающий на разряднике за счет переходных токов, протекающих по проводу до точки заземления, согласно закону индукции равен

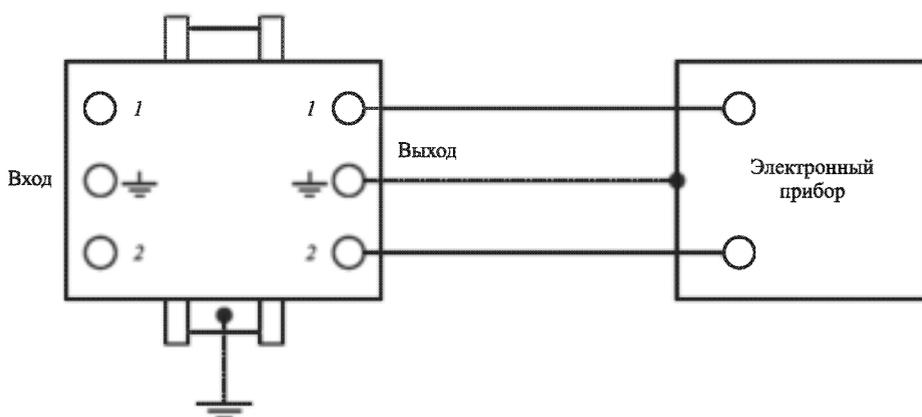
$$U = L \frac{di}{dt}. \quad (5.1)$$



**Рис. 5.14. Неправильное заземление ограничителя перенапряжений и защищаемого электронного прибора**

Ток возвращается по второму проводу в общую точку. Потенциал шины *PE* электронного прибора равен индуцированному напряжению. Как уже отмечалось в первом примере (см. рис. 5.12), действие ограничителя перенапряжений ослабляется или теряется полностью.

При правильном присоединении (рис. 5.15) защищаемый электронный прибор связан с потенциалом земли не непосредственно, а через опорную точку ограничителя перенапряжений. Разность потенциалов между шиной *PE* электронного прибора и активными проводами соответствует разности потенциалов между землей и активными проводами. Высокая разность потенциалов между опорной точкой ОПН и шиной уравнивания потенциалов не оказывает влияния на электронный прибор. Увеличение расстояния между ОПН и защищаемым объектом не изменяет перенапряжение на электронном приборе, так как через провод заземления переходный ток на изолированный электронный прибор не поступает.



**Рис. 5.15. Правильное присоединение к «земле» ограничителя перенапряжений и защищаемой электроники**

В то время как система уравнивания потенциалов должна выполняться по возможности сетчатой, чтобы уменьшить разность потенциалов между двумя любыми точками, защищаемые объекты к этой системе присоединяются звездообразно расположенными проводами. Перед центральной точкой звезды располагаются, прежде всего, ограничитель перенапряжений, а затем на одном из лучей звезды защищаемые электронные приборы. Для снижения стоимости, экономии места и эффективного расположения необходимо предусмотреть последовательную установку ограничителей перенапряжений, используя, по крайней мере, два зажима *PE*. Звездообразная схема соединения электронных приборов, защищенных варисторами, работающая совместно с сетчатой системой уравнивания потенциалов, показана на рис. 5.16.

**Импульсы испытательных токов и напряжений.** Импульс испытательного тока при коммутациях регламентирован нормами МЭК-60-1. На рис. 5.17а представлен импульс испытательного тока 8/20 мкс, который в некоторых нормативных документах обозначается как импульс 6,4/16 мкс. При этом длительностью фронта считается интервал времени между значениями тока 0,1 и 0,9, а за длительность импульса принимается интервал времени между значениями тока 0,5 максимального, расположенными на восходящей и нисходящей частях кривой импульса (см. рис. 5.17б).

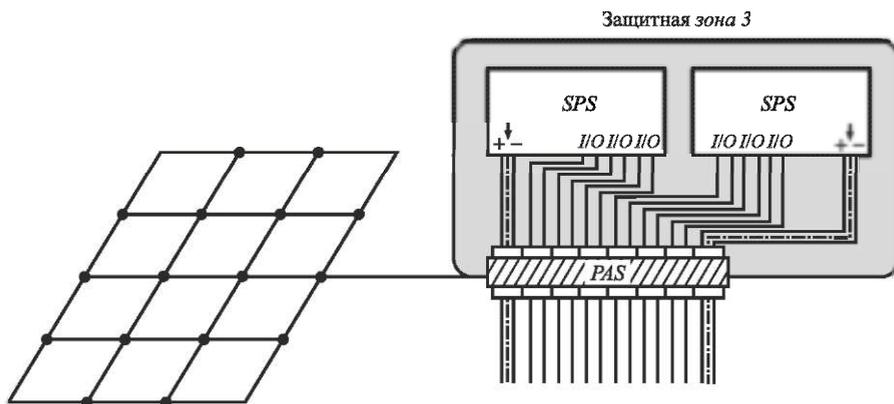


Рис. 5.16. Соединение электронного устройства, снабженного ограничителями перенапряжений с системой уравнивания потенциалов

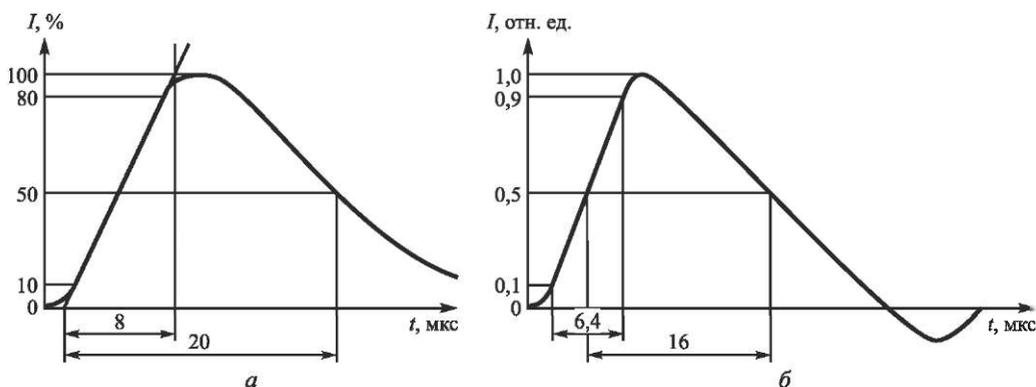


Рис. 5.17. Импульсы испытательных токов:

$a - 8/20$  мкс;  $b - 6,4/16$  мкс

Длительность фронта импульса  $8/20$  мкс определяется с помощью вспомогательной прямой, проведенной по точкам, соответствующим 10 и 90 % максимального значения тока. Разница во времени пересечения этой прямой с осью абсцисс и горизонтальной прямой, проведенной через точку максимума, должна составлять 8 мкс. Допуск на длительность фронта составляет  $\pm 10\%$  ( $\pm 0,8$  мкс). Длительность импульса определяется как время от условного начала импульса до момента его уменьшения до 50% от максимального значения. Длительность стандартного испытательного импульса составляет  $20 \pm 2$  мкс. Аналогично характеризуются и другие импульсы испытательных токов, например импульсы  $8/80$  мкс;  $10/350$  мкс;  $0,25/100$  мкс.

Импульс  $8/20$  мкс непосредственно не связан с током молнии. Он появляется при перекрытии изоляции в результате грозовых перенапряжений или срабатывания разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений. Его фронт и длительность формируются переходными процессами.

Импульсный ток принято выражать в процентах от максимального значения. С помощью стандартного импульса  $8/20$  мкс определенной амплитуды характеризуют способность разрядников выдерживать токовые нагрузки. Выдерживаемый ток обычно указывается изготовителем в паспорте разрядника.

Нормированные грозовые импульсы испытательных токов отличаются при разных полярностях заряда грозового облака. При отрицательном заряде немецкими промышленными нормами DIN 48810 установлен импульс тока первой вспышки 8/80 мкс. Импульс тока повторной вспышки при отрицательно заряженном облаке – 0,25/100 мкс. Импульс тока молнии, развивающейся с положительно заряженного облака, установленный нормами МЭК, имеет длительность фронта 10 мкс и время спада до 50 % от максимального значения – 350 мкс. Этот импульс обозначается 10/350 мкс.

Типичные испытательные импульсы тока (50 кА – импульс 10/350 мкс и импульс 8/80 мкс, а также импульс 8/20 кА амплитудой 15 кА) можно сравнить (рис. 5.18). Различные площади, ограниченные кривыми, наглядно демонстрируют различие в требованиях, предъявляемых к разрядникам при положительной и отрицательной полярностях. Заряд при импульсе 10/350 мкс примерно в 20 раз превышает заряд при импульсе 8/20 мкс. Поэтому важно сравнивать не только амплитуды, но и учитывать форму импульсов. Например, варистор не способен выдерживать токи 50 кА 10/350 мкс или 8/80 мкс, но выдержит такой ток при импульсе 8/20 мкс. Разрядники могут выдерживать токи, несущие большую энергию.

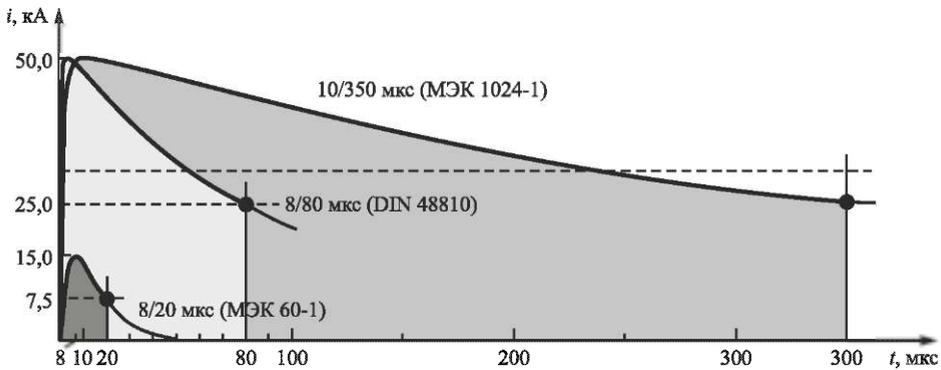


Рис. 5.18. Формы импульсов испытательных токов

Важной характеристикой защитных элементов является падение напряжения на них. Если речь идет о разряднике, то это падение напряжения в приэлектродных зонах и на канале разряда. Для варистора важным является остающееся напряжение во много раз большее, чем падение напряжения на разряднике при соизмеримых токах.

При испытаниях изоляции на электрическую прочность принят импульс перенапряжений 1,2/50 мкс (МЭК-60-1) (рис. 5.19а). При определении длительности фронта используют точки 30 и 90 % (см. рис. 5.17а). Длительность импульса принимается как время спада напряжения до 50 % от максимального значения. Обычно напряжение определяется в процентах от максимального значения. Этот импульс обозначается 1/50 мкс, если интервалы времени обозначить как на рис. 5.17б.

При сравнении разрядников остающееся напряжение определяется при одном и том же токе.

Во многих публикациях при рассмотрении переходных токов и напряжений используют упомянутые нормированные формы импульсов. Эти формы импульсов очень важны как для расчетов возникающих перенапряжений, так и для определения рассеиваемой энергии в разрабатываемых разрядниках и ограничителях перенапряжений. Кроме того, на их основе определяются остающиеся напряжения в зависимости от времени

срабатывания разрядника. По времени нарастания амплитуды импульса тока можно определить крутизну  $di/dt$ .

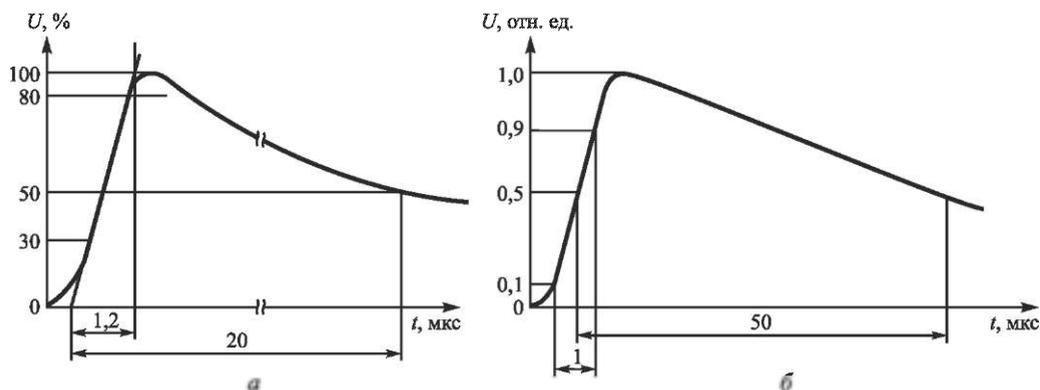


Рис. 5.19. Формы импульсов перенапряжений:

$a - 1,2/50$  мкс;  $b - 1/50$  мкс

Если известны индуктивность проводов и схема их прокладки или элементы, обтекаемые током, то по закону индукции напряжение на проводе с индуктивностью  $L$  можно определить по формуле (5.1).

Речь идет о динамическом процессе, который должен отображать формы импульсов тока.

Для характеристик мощности ограничителя перенапряжений решающим является не только максимальный протекаемый ток, но и время, в течение которого он протекает через ограничитель. На характеристике ток–время, которую можно представить графически, площадь представляет собой заряд

$$Q = \int i dt.$$

Для сравнения применяется характеристика – интеграл квадрата тока по времени. Она представляет собой энергию, выделяющуюся на сопротивлении 1 Ом:

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt.$$

Ее предпочтительно использовать для оценки нагрева защищаемого устройства или прибора при известном активном сопротивлении цепи, по которой протекает ток.

## 5.2. Схемы защит сетей от перенапряжений

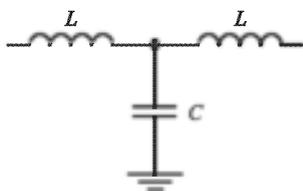


Рис. 5.20. Фильтр низких частот

Варисторы и ограничительные диоды имеют относительно высокую емкость. Они образуют совместно с индуктивностями проводов и развязывающими индуктивностями фильтр низких частот (рис. 5.20). При частотах полезного сигнала до 30 кГц применение обычных ограничителей не вызывает трудностей. При более высоких частотах демпфирующее действие ограничителя перенапряжений становится большим и наступает искажение полезного сигнала или даже его подавление.

Устройства для передачи сигналов с большими частотами выполняют без варисторов. Кроме того, оказывает влияние демпфирование в цепях, в которых вместо развязывающей индуктивности использовано активное сопротивление. Такие устройства требуются при передаваемых частотах от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц.

Если передаваемая частота превышает указанный предел, то возможно применение двухступенчатого ограничителя, имеющего мостовую схему (рис. 5.21). В зависимости от механической конструкции, эту схему можно заключить в корпус. При этом достигается частота до 200 МГц при затухании 3 дБ. При использовании одноступенчатого газонаполненного разрядника возможна передача сигналов частотой выше 1 ГГц.

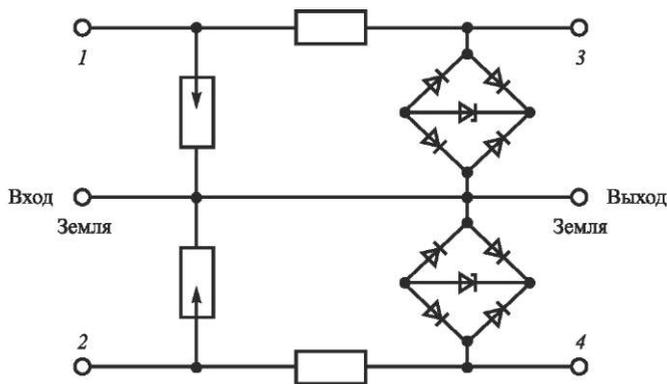


Рис. 5.21. Мостовая схема с малой емкостью

Защитный уровень такого разрядника зависит от статического разрядного напряжения и от вольт-секундной характеристики. Все защищаемые элементы на входе (антенна, интерфейс данных) в этом случае должны иметь электрическую прочность при импульсе 1,2/50 мкс выше 1 кВ.

При более полной защите от перенапряжений стремятся к трехступенчатой системе с индуктивными развязывающими элементами. Лишь при наличии высокочастотных ответвлений переходят к двухступенчатой схеме с активными развязывающими элементами или к одноступенчатому разряднику.

Любой разрядник в соответствии с принципом работы требует времени для срабатывания. Переходные процессы с крутым нарастанием напряжения приводят к возрастанию напряжения срабатывания разрядника. Остаточное напряжение является важнейшим параметром при выборе разрядника. Для сравнения разрядников используется импульс напряжения крутизной 1 кВ/мкс или импульс 1,2/50 мкс.

Чтобы защитить электрические и электронные приборы от разрушения из-за перенапряжений и предотвратить сильные переходные токи, необходимо использовать защитные схемы, способные быстро реагировать на сильные токи и дополнительно создавать низкий уровень остающихся напряжений. Так как переходные перенапряжения имеют малое время нарастания в микросекундном и наносекундном диапазоне, то необходимы элементы с очень малым временем срабатывания, чтобы осуществить защитные мероприятия уже на фронте и тем самым снизить остающееся напряжение. С помощью таких элементов можно быстро осуществить уравнивание потенциалов, т.е. организовать короткое замыкание активных проводов друг с другом или на землю.

Электронное устройство с симметричной схемой электропитания, корпус которого соединен с системой уравнивания потенциалов, имеющей потенциал земли, показано на рис. 5.22.

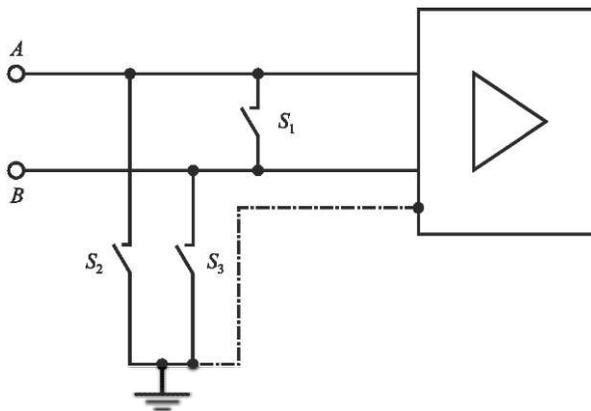


Рис. 5.22. Короткозамыкатели в электронном устройстве

Между каждым активным проводом и землей, а также между обоими активными проводами находятся короткозамыкатели  $S$ . Если, например, провод  $A$  подвергается перенапряжению, то возникает разность потенциалов как между проводниками  $A$  и  $B$ , предназначенными для рабочего напряжения, так и между проводом  $A$  и землей. При замыкании выключателя  $S_1$  происходит выравнивание потенциалов между проводом  $A$  и  $B$ . Возникающее при этом короткое замыкание приводит к исчезновению напряжения между ними. Электронное устройство, таким образом, не чувствует перенапряжения после замыкания.

После замыкания выключателя  $S_2$  создается короткое замыкание между проводом  $A$  и землей. Переходные токи, идущие по этому пути, отводятся в землю, и через электронное устройство не протекает кратковременный ток. Одновременно замыкается выключатель  $S_3$ , включенный между проводом  $B$  и землей. Возможно протекание части тока после срабатывания выключателя  $S_1$  из проводника  $A$  в проводник  $B$ , а также в землю.

Эффективная защита от перенапряжений требует установки разрядников, согласованных по мощности и с параметрами системы. Такая установка должна проводиться квалифицированно. Разрядник сам не в состоянии обеспечить требуемый уровень защиты. После того, как подходящий разрядник выбран, правильно установлен при соблюдении важнейших указаний по установке, задачи защиты можно считать выполненными. Эти указания рассматриваются далее. Кроме того, необходимо соблюдать указания изготовителя.

Для сетей электропитания выпускают разрядники от двух- до четырехфазного исполнения как выполненные в одном корпусе, так и модульного одноканального исполнения. Они должны устанавливаться с предохранителями на случаи перегрузки током молнии или током короткого замыкания трансформатора. Предохранитель требуется и на случай короткого замыкания при токах, больших, чем токи, которые разрядник способен отключить самостоятельно, из-за износа электродов при частых срабатываниях или при выделении в нем большой энергии. Предохранители  $F_2$  требуются лишь тогда, когда превышаются данные изготовителя для максимального тока предохранителя  $F_1$  (рис. 5.23). Рекомендуется выбирать предохранители  $F_1$  и  $F_2$  с учетом селективности.

Это значит, что отношение токов для них должно быть 1 : 1,6, т.е.  $F_1$  должен иметь срабатывание на две ступени выше, чем  $F_2$ . Если  $F_2$  сработает из-за большого тока короткого замыкания трансформатора, то установка останется в работе, благодаря не сработавшему  $F_1$ .

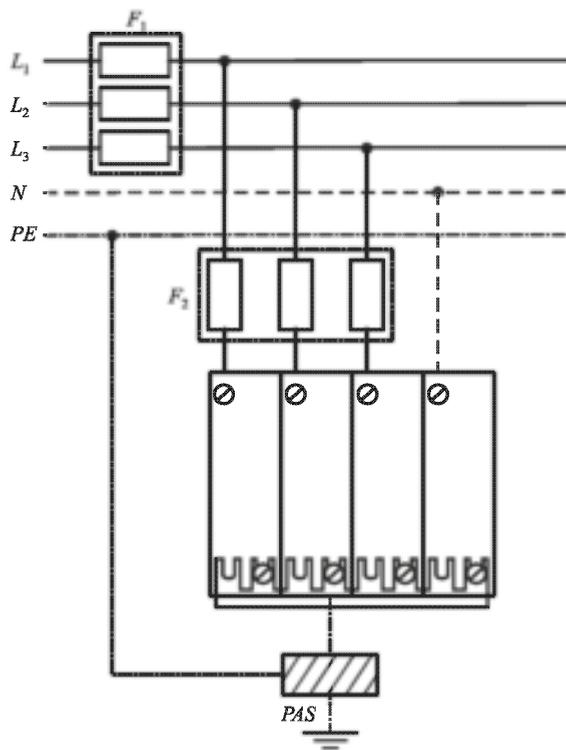


Рис. 5.23. Схема с предохранителями  $F_2$ , включенными последовательно с разрядниками

Для обеспечения селективности срабатывания  $F_2$  необходимо оценить, какой ток короткого замыкания ожидается при срабатывании разрядника. В табл. 5.2 указаны предохранители, которые необходимо выбрать при срабатывании разрядника в соответствии с током короткого замыкания (какой из предохранителей должен сработать, а какой не должен).

При этом становится ясным, реализуется ли селективность срабатывания предохранителей  $F_1$  и  $F_2$ .

**Пример.** При определенной конструкции разрядника ожидаемый ток короткого замыкания составляет 3,5 кА (2-я строка сверху) в сети 400 В, реальный ток короткого замыкания – 2,4 кА, а для сети 230 В – 1,8 кА. Наименьшее ее значение – результат влияния на ток короткого замыкания установленного оборудования и разрядника. Реальные токи короткого замыкания требуют применения для разрядника указанного типа в сети 400 В предохранителя на 125 А, а в сети 230 В – на 100 А.

Ток, проходящий через разрядник 3,5 кА спустя 8,1 мс самостоятельно гасится, включенный предохранитель на 125 А не срабатывает (рис. 5.24). По восстанавливающемуся напряжению синусоидальной формы после гашения дуги в разряднике видно, что предохранитель не сработал.

### Ток короткого замыкания и минимальная уставка предохранителей при использовании разрядников с выдуванием дуги на пластину

Ожидаемый ток короткого замыкания, кА	Реальный эффективный ток короткого замыкания, кА при номинальном напряжении		Минимальная уставка предохранителей, А при номинальном напряжении	
	400 В	230 В	400 В	230 В
4,0	–	2,0	–	125
3,5	2,4	1,8	125	100
3,0	2,0	1,5	125	100
2,5	1,7	1,3	100	80
2,0	1,4	1,0	80	63
1,5	1,0	0,8	63	50
1,0	0,7	0,6	50	35

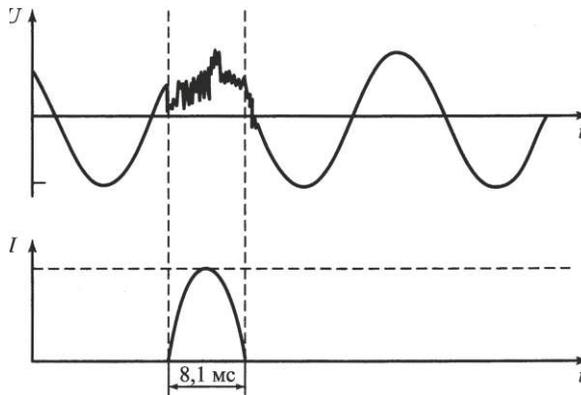
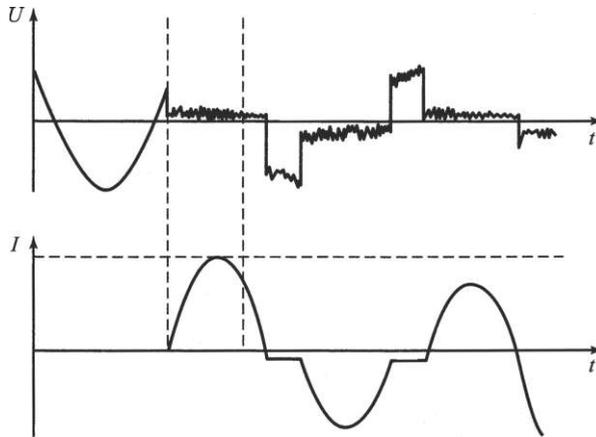


Рис. 5.24. Разрядник отключает ток короткого замыкания самостоятельно

Если разрядник не в состоянии самостоятельно отключить сопровождающий ток и при этом предохранитель имеет слишком высокую уставку, то гашение дуги сопровождающего тока происходит слишком поздно, и разрядник разрушается. Этот процесс показан на рис. 5.25 в опыте с разрядником устаревших конструкций.

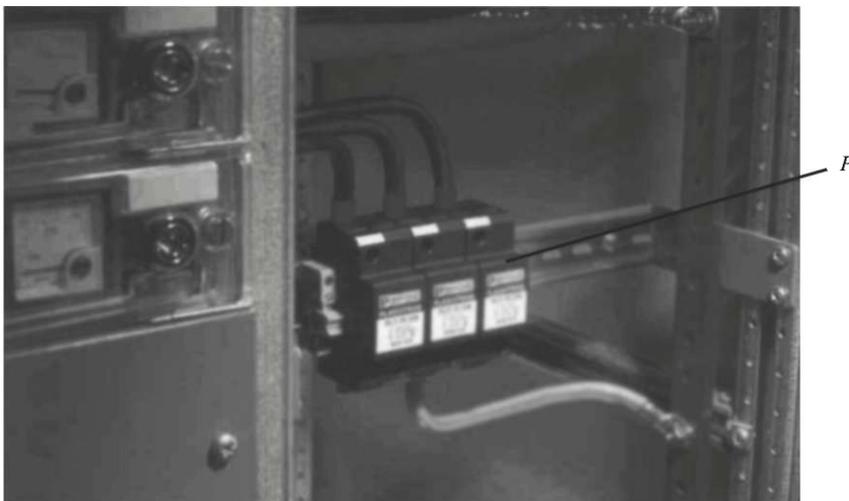
Самостоятельное гашение дуги сопровождающего тока в разряднике без срабатывания предохранителя обеспечивает высокую надежность электроснабжения приборов и устройств. Само собой разумеется, что предохранитель при высоких токах молнии, например, при 30 кА и импульсе 10/350 мкс будет разрушен. Во время разрушения образуется дуга. Более короткие импульсы (8/80 мкс) или меньшие по амплитуде импульсы (10/350 мкс) не разрушают предохранители в питающей сети или в цепи разрядников. В этом случае энергии грозового импульса тока недостаточно, и для разрушения предохранителей необходима энергия источника питания (энергия короткого замыкания трансформатора). Дугогасительная возможность разрядника и устойчивость

предохранителя и провода, идущего к системе уравнивания потенциалов, очень важны. Максимальное сечение плавкого предохранителя, включаемого последовательно с разрядником, указывает изготовитель. В соответствии с рекомендациями МЭК медный провод, идущий от разрядника к системе уравнивания потенциалов, должен иметь площадь сечения не менее  $16 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 5.25.** Разрядник не гасит дугу сопровождающего тока

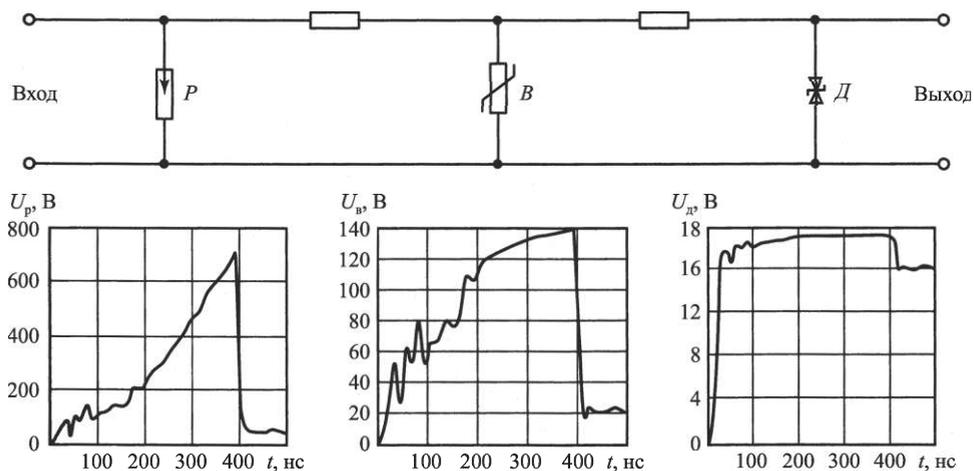
При срабатывании разрядника, функционирующего на принципе зажигания разряда между электродами, возникают выбросы горячего газа. Это явление не слишком опасно, но его необходимо учитывать в настоящее время. Существуют некоторые рекомендации отдельных изготовителей по устранению влияния выбросов на части, находящиеся под напряжением или на горючие материалы. На рис. 5.26 показано размещение модульных разрядников в трехфазной системе с безопасным выбросом, при котором разрядники *P* располагаются так, чтобы в зоне выброса отсутствовало оборудование, для которого опасны эти выбросы (зона выброса расположена ниже разрядников).



**Рис. 5.26.** Установка разрядника с газовым выбросом в распределительном устройстве

Ограничители перенапряжений для защиты от продольных напряжений в распределительной сети на базе варисторов монтируются на шине с присоединением активных проводников и проводов системы уравнивания потенциалов. Если изготовитель задает максимально допустимое значение тока предохранителя ограничителя перенапряжений, превышающее значение тока через  $F_1$  (см. рис. 5.26), то в провод, идущий к ограничителю, включается дополнительный предохранитель  $F_2$  с большим допустимым током.

**Комбинированные защитные устройства** содержат, как правило, ступени тонкой (ограничительный диод или варистор) и грубой (разрядник) защиты. Часто применяются трехступенчатые защитные устройства со схемой, показанной на рис. 5.27.



**Рис. 5.27. Трехступенчатое защитное устройство и характерные напряжения на его элементах**

Отдельные ограничивающие элементы отделяются друг от друга полными сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$ . В информационно-измерительной сети  $Z_1$  и  $Z_2$  – активные сопротивления порядка 10 Ом. В сети электроснабжения это либо катушки индуктивности (примерно 10 мкГн), либо провода длиной от 5 до 15 м.

При воздействии импульса перенапряжения на такое устройство первой срабатывает тонкая защита (диод  $D$ ). Так как ограничительный диод не способен пропускать большой импульсный ток, то при возрастании падения напряжения на сопротивлении  $Z_2$  ток начинает протекать через варистор  $B$ . Увеличение напряжения на сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_2$  приводит к срабатыванию грубой защиты – разрядника  $P$ . В комбинированном устройстве решается проблема рассеиваемой в нем энергии при воздействии импульса перенапряжения. Только незначительная часть импульсного тока протекает через тонкую ступень защиты. Работа варистора облегчается при срабатывании разрядника из-за малого значения его остающегося напряжения.

В комбинированном устройстве реализуется существенное снижение перенапряжения или кондуктивной помехи. Напряжение на выходе такого устройства может быть снижено примерно до 10–20 В при входном импульсном напряжении порядка киловольта, что наглядно продемонстрировано на рис. 5.27.

Как уже отмечалось, провода, идущие к разряднику и от разрядника к системе уравнивания потенциалов, выбирают в соответствии с указаниями изготовителя. Они

не должны иметь сечение медного провода менее 16 мм<sup>2</sup>. Если речь идет о проводе уравнивания потенциалов, который не используется для уравнивания потенциалов при токе молнии, то допускается минимальное сечение медного провода 6 мм<sup>2</sup>.

Разрядник, встроенный в прибор, подключается к проводам системы электроснабжения на некотором расстоянии от входных элементов прибора. При этом соблюдается следующий принцип: элементы, ограничивающие продольное напряжение, должны ограничивать и поперечное напряжение. При установке этого разрядника необходимо обращать внимание на максимально допустимые номинальные токи, так как рабочий ток проходит через защитное устройство. Схема защиты прибора приведена на рис. 5.28.

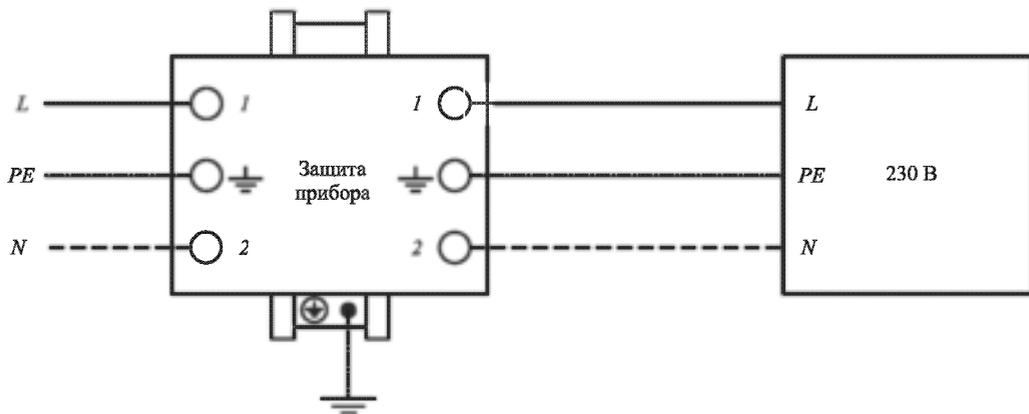


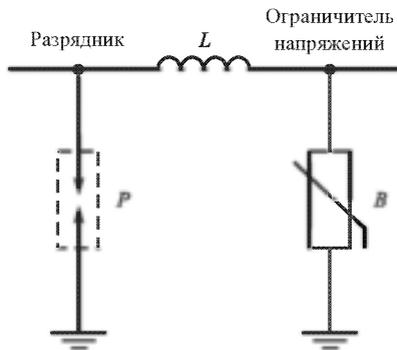
Рис. 5.28. Защита от перенапряжений при однофазном питании

**Координация параметров разрядников в сети низкого напряжения.** В описанной ранее схеме функционирования многоступенчатой защиты с разрядником элементы не должны быть связаны друг с другом. Для развязки можно использовать резисторы или катушки индуктивности. Таким же образом элементы должны быть развязаны в сети низкого напряжения, т.е. требуется координация параметров разрядников. Катушки индуктивности пригодны для развязки лишь в редких случаях, так как для передачи сильного длительного тока катушки должны иметь большое сечение провода.

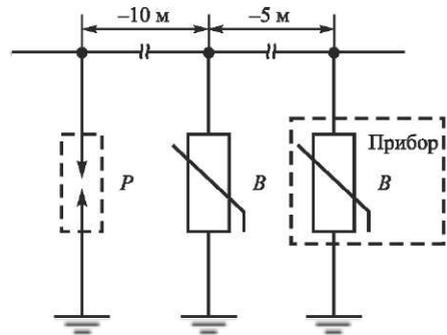
Лишь при длительных токах до 60 А в сети питания можно использовать развязывающие элементы серийного изготовления. При выборе катушек нужно иметь в виду, что при слишком большой индуктивности высокое падение напряжения на развязывающей катушке приведет к частым повторным пробоям разрядника. Для развязки следует использовать только воздушные катушки, так как катушки с железом при больших токах быстро насыщаются, в результате чего снижается их индуктивность. Поэтому использование индуктивности для развязки ограничено. Выбор любой катушки с достаточной пропускной способностью по току не приведет к желаемой цели. Выбор облегчается, если изготовитель разрядника предлагает катушку с достаточным током. Катушка, включаемая как показано на рис. 5.29, должна иметь индуктивность от 7–15 мкГн.

В большинстве случаев в качестве развязывающих элементов используются провода электроснабжения главной распределительной сети, местной распределительной сети или провода между местной сетью и конечным прибором. Длины проводов должны быть такими, чтобы в нормальном режиме ожидаемая крутизна тока  $di/dt$  тока переходных процессов обеспечивала достаточное падение напряжения. Перегрузка

защитного элемента должна быть такой, чтобы при переходных процессах в наиболее прочном элементе выделялась допустимая энергия. Расчеты и эксперименты показали, что между грозвым разрядником и ограничителем перенапряжений длина проводов должна составлять примерно 10 м, а между ограничителем перенапряжений в сети и защитой прибора – не менее 5 м. Любой металлический провод имеет собственную индуктивность, которая играет роль индуктивности развязки, вместо катушки индуктивности в предыдущем случае. Для подтверждения этого можно сравнить рис. 5.29 и 5.30.



**Рис. 5.29. Развязка между разрядником и ограничителем перенапряжений**



**Рис. 5.30. Использование провода в качестве развязывающего элемента**

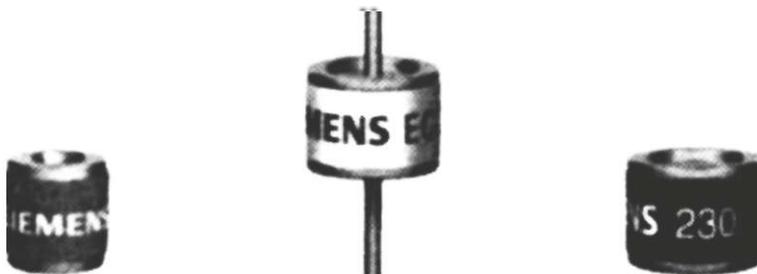
Если провода должны быть более короткими, то решение принимается в зависимости от общей схемы защиты. К сожалению, риск повреждения защитного устройства, в частности, повреждения или разрушения разрядников, повышается. Функция защитной схемы – координация параметров элементов. Например, ограничительный диод бессмысленно координировать с разрядником. Вторая ступень защиты за грозвым разрядником может реализоваться мощным варистором, выдерживающим ток не менее 10 кА (8/20 мкс). Третья ступень, если она требуется, должна располагаться от защищаемого прибора не менее чем в 5 м от сети питания. Если в поперечном ответвлении требуется ограничение напряжения, то должны использоваться элементы, способные пропустить ток не менее 1,5 кА (8/20 мкс). Нельзя использовать разрядник со случайными свойствами без координации его параметров с остальными элементами.

### **5.3. Элементы для уравнивания потенциалов и ограничения перенапряжений**

Отключение длительного короткого замыкания выключателями в схеме на рис. 5.22 было бы лучшей защитой от перенапряжений, но работа электроники при коротком замыкании была бы невозможна. Поэтому вместо выключателей необходимы элементы, которые контролировали бы напряжение между обоими проводами и выключались бы после исчезновения напряжения. Эти элементы из-за известного времени нарастания переходных процессов должны срабатывать за наносекунды.

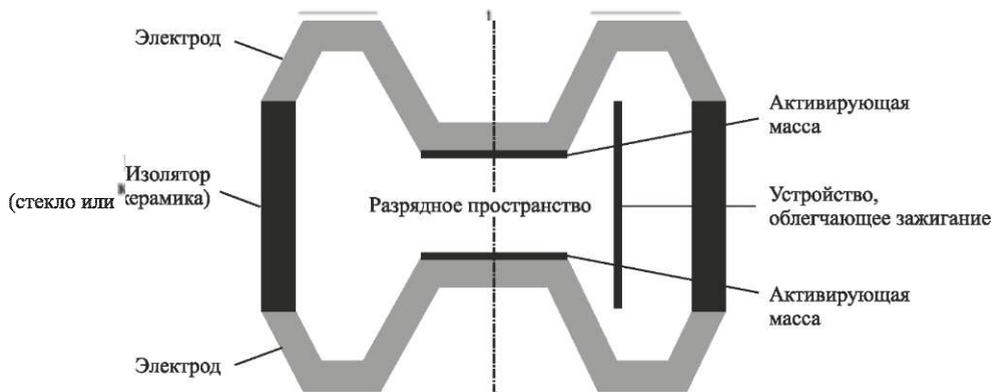
Электромеханические устройства работают слишком медленно. Далее рассмотрим элементы, пригодные для защиты от перенапряжений, а также отметим их преимущества и недостатки.

**Газонаполненные разрядники.** Специально для телекоммуникационных устройств уже десятки лет изготавливают газонаполненные разрядники. Эти разрядники, несмотря на малые размеры, имеют очень большие мощности. Газонаполненные разрядники, показанные на рис. 5.31, способны пропускать токи переходных процессов в десятки килоампер (импульс 8/20 мкс). Разрядник состоит из малой стеклянной или керамической трубочки, по обоим концам которой расположены металлические электроды. Герметичное газоразрядное пространство между этими электродами заполнено инертным газом, преимущественно аргоном или неонам.



**Рис. 5.31. Газонаполненные разрядники**

Электроды в разрядном пространстве покрыты активирующей массой. Специальные газонаполненные разрядники имеют вспомогательный электрод для зажигания (рис. 5.32). Чтобы гарантировать малый разброс разрядного постоянного напряжения, газонаполненные разрядники имеют внутри слабое радиоактивное покрытие. В зависимости от типа и изготовителя достижимы токи до 40 кА (импульс 8/20 мкс). В ступени грубой защиты для измерительной, управляющей и регулировочной техники, а также в устройствах обработки данных требуются разрядники на 2,5; 5,0 и 10,0 кА (импульс 8/20 мкс).



**Рис. 5.32. Разрядник с устройством, облегчающим зажигание**

Если между электродами приложить напряжение, которое равно или больше напряжения зажигания  $U_z$  (рис. 5.33), то разрядник зажигается. Если этот элемент используется как коммутатор, то говорят о его «жестком» режиме.

После зажигания напряжение между электродами падает сначала до напряжения тлеющего разряда, а потом при возрастании тока в газонаполненном разряднике –

до напряжения горения дуги. Напряжение горения дуги составляет обычно 10–20 В. Газонаполненные разрядники очень быстро срабатывают (характерное время срабатывания лежит в микросекундной области).

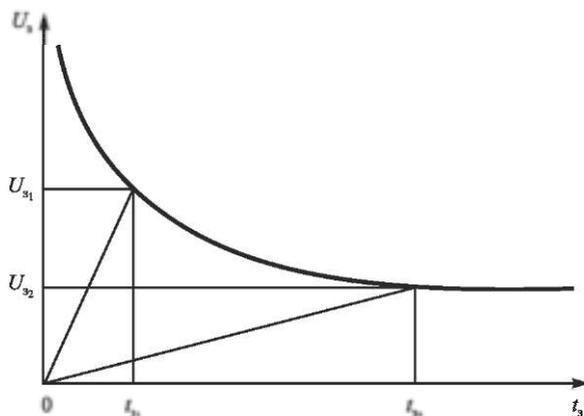


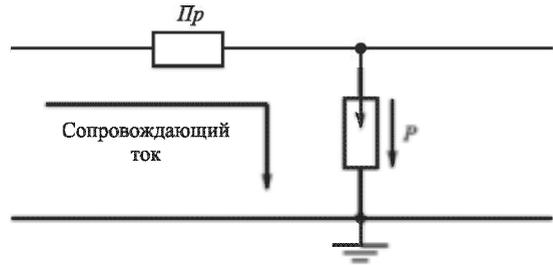
Рис. 5.33. Характеристика зажигания газонаполненного разрядника

Недостатки газонаполненных разрядников обусловлены характеристиками зажигания и гашением сопровождающего тока. Напряжение зажигания в зависимости от нарастания переходного напряжения показано на рис. 5.33. Медленно нарастающее напряжение с крутизной примерно 100 В/с пересекает характеристику зажигания в момент  $t_{z2}$  в области электрической прочности при постоянном напряжении. Напряжение пробоя обозначено через  $U_{z2}$ . При более быстрых переходных процессах в микросекундной области имеет место пересечение характеристики зажигания при существенно большем напряжении. Точка пересечения обозначена координатами  $t_{z1}$  и  $U_{z1}$  (см. рис. 5.33). Это напряжение может превышать электрическую прочность разрядника при постоянном напряжении во много раз. Таким образом, газонаполненный разрядник имеет зависящую от времени характеристику зажигания. Это означает, что уровень защиты от переходных перенапряжений нельзя точно определить. Подобный эффект объясняется тем, что для ионизации инертного газа требуется время.

Если газонаполненный разрядник зажегся, то он должен выдержать сопровождающий ток короткого замыкания соответствующего контура, особенно при малом полном сопротивлении сети. Это является побочным эффектом, так как газонаполненный разрядник после окончания переходных процессов должен отключить ток. Газонаполненный разрядник не в состоянии долгое время пропускать сетевой ток и поэтому либо разрушается спустя некоторое время, либо перекрывается.

Сопровождающий ток из сети, протекающий через газонаполненный разрядник после его срабатывания, показан на рис. 5.34. В сети с малым полным сопротивлением из-за большого тока дуга не гаснет при переходах тока через ноль. В этом случае следует использовать вспомогательное средство гашения — включенный последовательно с разрядником предохранитель *Пр*. В сети с высоким полным сопротивлением даже при номинальном напряжении и постоянном напряжении проблем с гашением дуги не возникает. В цепях постоянного тока с номинальным напряжением, меньшим падения напряжения на дуге, газонаполненный разрядник гасит дугу самостоятельно.

Рис. 5.34. Сопровождающий ток, протекающий через газонаполненный разрядник



**Варисторы.** Их можно назвать элементами с «мягкой» характеристикой. Свое название варистор получил от английского «variable resistor». Он состоит из большого числа последовательно и параллельно соединенных диодов, работающих в запертом режиме. В то время как раньше использовались только варисторы из карбида кремния, в последние годы применяют, как правило, оксидно-цинковые (ZnO). Их часто обозначают MOVС (metal oxide varistor).

Главное применение оксидно-цинковых варисторов – защита от перенапряжений – вытекает из вольт-амперной характеристики. На рис. 5.35 для сравнения приведены вольт-амперные характеристики оксидно-цинкового и кремний-карбидного варисторов. Оксидно-цинковый варистор даже в килоамперной области имеет более низкий уровень остающегося напряжения.

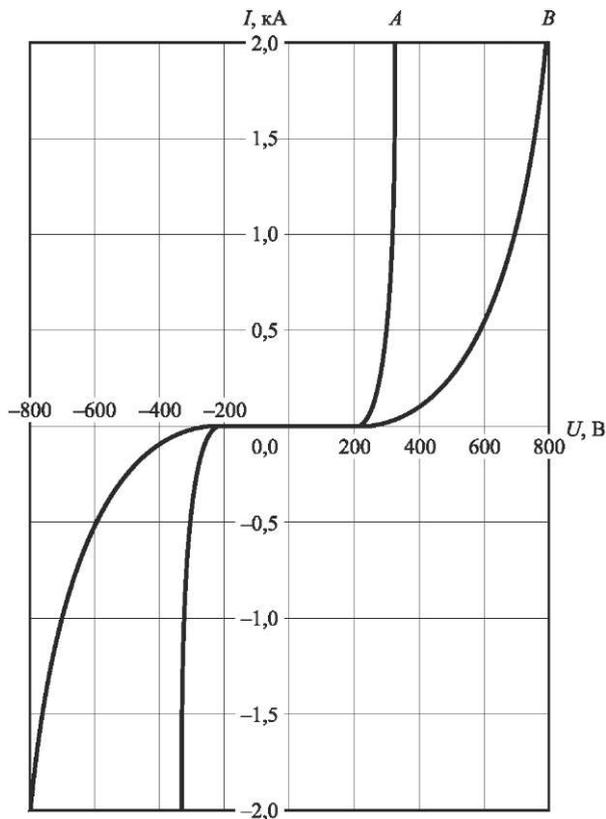
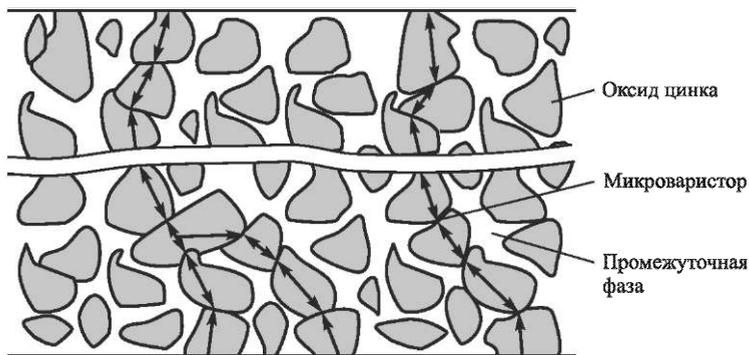


Рис. 5.35. Типичные вольт-амперные характеристики варисторов:  
*A* – металлооксидного; *B* – кремний-карбидного

Спеченный материал для оксидно-цинкового варистора состоит на 90 % из оксида цинка и на 10 % из оксидов других металлов. Эффект варистора возникает на границе зерен оксида цинка (рис. 5.36). Большое число микроваристоров образуют варистор, который при увеличении площади приобретает способность пропускать большие токи. С увеличением толщины варисторной шайбы повышается защитный уровень, так как число включенных последовательно микроваристоров возрастает, падение напряжения в каждом из них составляет несколько вольт. Рассматривая рис. 5.35 и 5.36, можно сделать выводы о возможностях варистора и об ограничении остающегося напряжения.



**Рис. 5.36. Микроструктура оксидно-цинкового варистора**

Варистор имеет симметричную вольт-амперную характеристику, с увеличением напряжения сопротивление падает, и, следовательно, при импульсном воздействии потенциал может быть ограничен. Поэтому варистор является хорошим элементом для защиты от перенапряжений. Он реагирует на появление напряжений за наносекунды, т.е. существенно быстрее, чем описанные газонаполненные разрядники.

Недостатками варисторов при их использовании для защиты от перенапряжений являются средняя способность поглощать энергию, старение, сравнительно высокая ёмкость, а также меньшие, по сравнению с разрядниками, токи. В сетях низкого напряжения применяют варисторы при токах в несколько десятков килоампер (импульс 8/20 мкс). В принципе этого достаточно для ограничения перенапряжений в электрических устройствах. Применяемые варисторы способны пропустить токи (импульсы 10/350 мкс) только до нескольких килоампер.

Переход от запертой области в открытую происходит не скачком, однако очень быстро, в течение сотен пикосекунд (см. рис. 5.35). Преимущества варисторов – короткое время срабатывания, ограничение напряжения при возникновении разности потенциалов примерно 1,8 от номинального. Характеристики варисторов высокого напряжения (ОПН) приведены в работе [30].

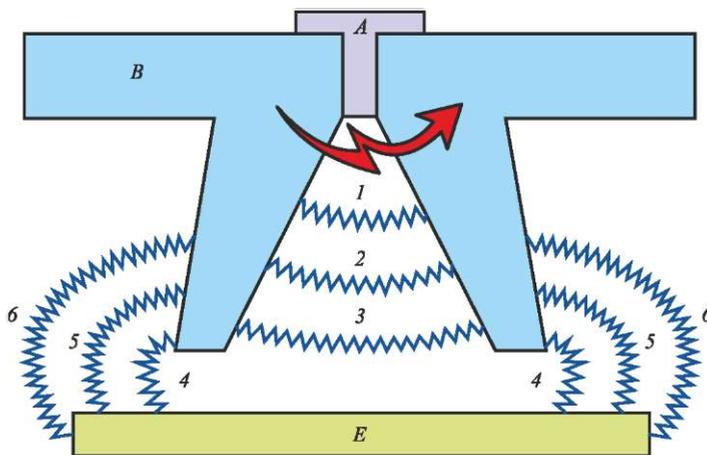
**Ограничительные диоды** – кремниевые полупроводниковые устройства, служащие для одностороннего или двустороннего ограничения импульсов напряжения, обусловленных переходными процессами, разрядами статического электричества или введенными электромагнитными импульсами. Время срабатывания ограничительных диодов – единицы пикосекунд на обратной ветви вольт-амперной характеристики, единицы наносекунд – на прямой ветви. Импульсные токи диодов – до сотен ампер, входная емкость – до сотен пикофарад. Напряжение ограничения – вольты, десятки и сотни вольт.

**Разрядники для выравнивания потенциалов в сетях электроснабжения.** Если при перенапряжениях, вызванных коммутациями, разрядами статического электричества и другим, кратковременное короткое замыкание (уравнивание потенциалов) осуществляется с помощью варистора, газонаполненных разрядников, ограничительных диодов, то при грозовом разряде эту функцию может выполнить специальный разрядник. Грозовой разряд несет большую энергию, которую способен поглотить только искровой разрядник.

Большая энергия получается не только из-за высоких амплитуд тока, но и за счет большой длительности. В 80 % случаев речь идет о разрядах с отрицательно заряженного облака. При них длительность импульса тока составляет 80–100 мкс. Молния из положительно заряженного облака имеет длительность импульса несколько сотен микросекунд. В стандарте МЭК указывается, что импульс с наибольшим энергосодержанием – 10/350 мкс. Так как неизвестно, будет ли молния развиваться с положительно или отрицательно заряженного облака, в нормах МЭК приняты наиболее жесткие параметры тока – импульс 10/350 мкс.

Разрядники для уравнивания потенциалов, через которые может протекать часть тока молнии (импульс 10/350 мкс) и сопровождающий ток короткого замыкания (в течение полупериода промышленной частоты), выполняют со специальными электродами и дугогасительными решетками.

Разрядник с выдуванием дуги в области рогообразных электродов, с перемещением дуги на промежуточный электрод-пластину и с переводом раздвоенной дуги на внешние поверхности электродов показан на рис. 5.37.



**Рис. 5.37. Разрядник для выравнивания потенциалов в сети электроснабжения**

После срабатывания разрядника (пробоя по поверхности диэлектрической вставки *A*) дуга перемещается по электродам *B* (положения 1–3 на рис. 5.37), затем дуга переходит на пластину *E*, раздваиваясь (положение 4). Далее происходит удлинение дуг (положения 5 и 6), в результате чего возрастает напряжение на разряднике и облегчается гашение дуги.

Еще большей дугогасительной способностью отличается разрядник для уравнивания потенциалов (рис. 5.38). В нем, как и в разряднике на рис. 5.37, разряд зажигается при пробое по поверхности диэлектрической вставки *A* между электродами *B*, затем

канал разряда, переходящий в дуговую стадию, перемещается между электродами *B* (положения 1–4), перебрасывается на пластину *E* (положение 5) и затем поступает в дугогасительные камеры со вспомогательным электродом *C* и металлическими пластинами *D* (положения 7 и 8).

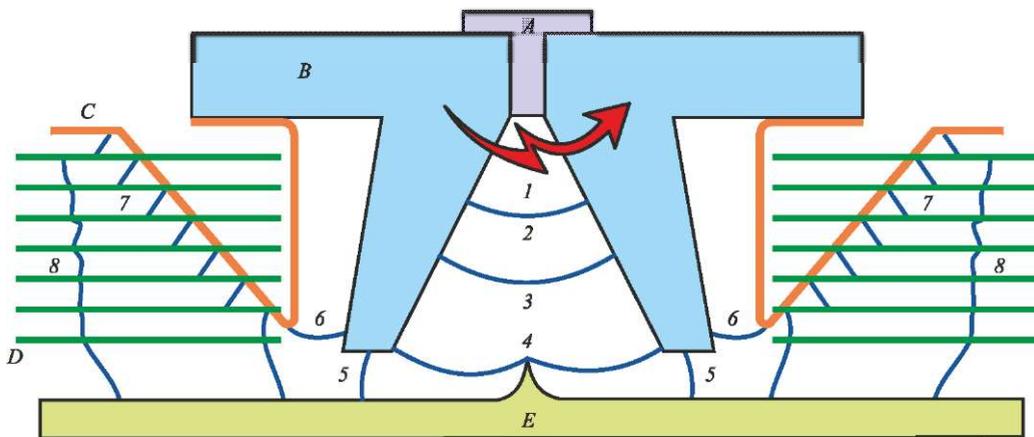


Рис. 5.38. Разрядник с повышенными дугогасительными свойствами

В таком разряднике напряжение при сопровождающем токе короткого замыкания возрастает не только за счет увеличения длины дуги, но и дополнительных падений напряжения приэлектродных зон в дугогасительной решетке (примерно по 20 В на каждом зазоре).

Разрядники, как правило, имеют отверстия для выхлопа плазмы, что необходимо учитывать при их размещении во вводных и распределительных панелях (см. рис. 5.37 и 5.38). Они должны быть рассчитаны на пропускание импульсных токов (10/350 мкс), амплитуда которых определяется местом установки, характеристиками электрических и других металлических коммуникаций.

**Разрядники с поверхностным разрядом.** До 1993 года для уравнивания потенциалов при протекании в сети импульсных токов с амплитудой до 100 кА (8/80 мкс) использовались только коаксиальные разрядники с поверхностным разрядом. Такой разрядник состоит из двух кольцевых электродов из металлокерамики медь–вольфрам, разделенных тонкой фторопластовой пластинкой. При достижении пробивного напряжения на разряднике происходит пробой по поверхности, возникает дуга между электродами. Такой разрядник при напряжении до 28 вольт самостоятельно отключает гораздо меньшие сопровождающие токи, чем другие разрядники (см. рис. 5.37 и 5.38). Поэтому для гашения дуги в сети электропитания требуется дополнительное отключающее устройство. Обычно это предохранитель, включенный последовательно с разрядником. Выдерживаемые импульсные токи 10/350 мкс таких разрядников составляют 20–25 кА.

Новым типом разрядников для импульсов 10/350 мкс амплитудой до 75 кА являются коаксиальные **тандемные разрядники**. В них два коаксиальных искровых промежутка соединены последовательно. Их емкости не одинаковы, и поступающий импульс напряжения распределяется по ним неравномерно, тем самым облегчая пробой разрядника. Как и разрядники с поверхностным разрядом, тандемные разрядники способны самостоятельно гасить дуги с малыми сопровождающими токами короткого замыкания

сети электроснабжения при напряжениях до 255 В. При больших напряжениях их следует включать последовательно с предохранителями. Если разрядники (см. рис. 5.37 и 5.38), способны срабатывать многократно, то разрядники с поверхностным разрядом и тандемные разрядники, снабженные предохранителями, отключают сопровождающий ток однократно, и требуется замена предохранителя. Для облегчения обслуживания разрядники снабжают дистанционной сигнализацией срабатывания.

**Многогазорные газонаполненные разрядники закрытого исполнения** получили в настоящее время широкое распространение. Они самостоятельно гасят дугу сопровождающего тока благодаря большому падению напряжения на последовательно соединенных электродах (в основном это сумма приэлектродных падений напряжения), поэтому токи, поступающие в них из сети, сильно ограничены.

Общим недостатком ограничителей перенапряжения – варисторов в сетях электроснабжения 0,4 кВ является сравнительно высокое остающееся напряжение, лежащее в диапазоне от 2,5 до 4 кВ. Таким образом часто требуется дальнейшее ограничение напряжений, например с помощью второй ступени ограничения перенапряжений. При этом происходит трансформация импульса тока. Импульс 10/350 или 8/80 мкс может преобразоваться в импульс 8/20 мкс. Соответственно преобразуются и импульсы испытательных токов (рис. 5.39).

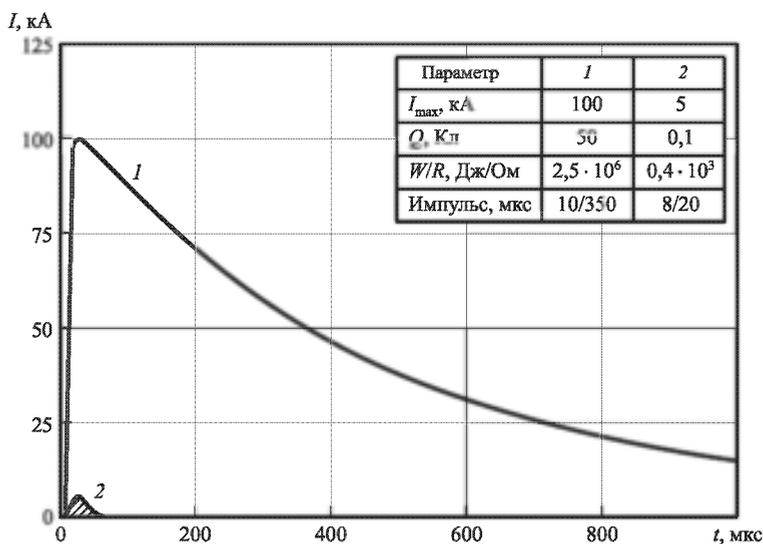


Рис. 5.39. Испытательные токи 10/350 мкс и 8/20 мкс

**Многоступенчатые ограничители перенапряжений.** Ранее описанные элементы (газонаполненные разрядники, варисторы и ограничительные диоды) могут быть объединены в единое защитное устройство, в котором используются полезные свойства отдельных элементов и снижается влияние недостатков отдельно взятых элементов. При объединении элементов следует соблюдать определенные условия.

Схема трехступенчатого устройства для ограничения перенапряжений с развязывающими полными сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$  приведена на рис. 5.27. Поясним еще раз принцип действия комбинированного устройства, применяемого в цепях измерения, управления и регулирования. Устройство (рис. 5.40) содержит газонаполненный

разрядник  $P$ , варистор  $B$  и ограничительный диод  $D$ . Между ними включены катушки индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ . Для упрощения понимания принципа действия предположим, что устройство подключено к активному фазному проводу и к земле.

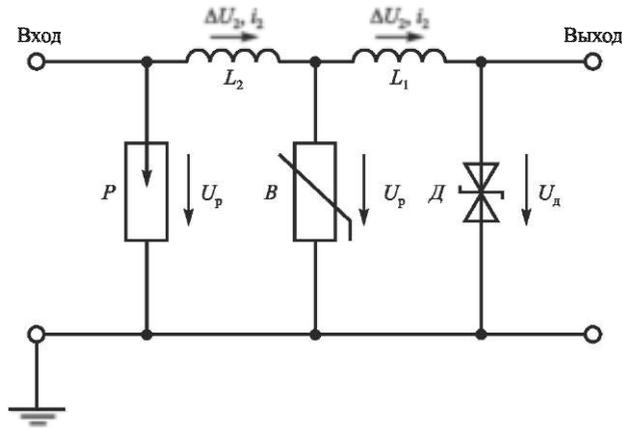


Рис. 5.40. Трехступенчатое защитное устройство

Газонаполненный разрядник  $P$  выбран потому, что он рассчитан на импульсные токи примерно 10 кА (8/20 мкс). Ограничительный диод  $D$  обеспечивает высокое быстродействие устройства и на нем ограничивается напряжение, примерно вдвое превышающее номинальное напряжение сети, в которую включено защитное устройство. С помощью варистора  $B$  исключается частое включение разрядника  $P$  и предохранителя, включенного в фазный провод линии. Варистор  $B$  способен пропускать ток 2,5 кА (8/20 мкс). Ограничительный диод  $D$  способен пропускать ток 0,6 кА (8/20 мкс).

При воздействии импульса напряжения на устройство первым срабатывает ограничительный диод, отводя часть тока в землю и уменьшая ток через электронный прибор, включенный на выходе защитного устройства. На входе прибора напряжение ограничивается диодом в соответствии с его вольт-амперной характеристикой.

На индуктивности  $L_1$ , содержащейся в защитном устройстве, возникает напряжение

$$\Delta U_1 = -L_1 \frac{di}{dt}.$$

К варистору  $B$  приложено напряжение

$$U_B = U_D + \Delta U_1.$$

В соответствии с вольт-амперной характеристикой варистора через него протекает ток. На индуктивности  $L_2$  возникает напряжение

$$\Delta U_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt}.$$

К разряднику  $P$  приложено напряжение

$$U_P = U_B + \Delta U_2.$$

Если это напряжение достигает напряжения пробоя разрядника, он срабатывает, и в землю отводится дополнительный ток.

Таким образом, устройство (см. рис. 5.40) содержит ступени грубой защиты (разрядник  $P$ ) и тонкой защиты (диод  $D$ ). Варистор  $B$  защищает диод  $D$  от разрушения, а разрядник  $P$  ограничивает выделение энергии в варисторе  $B$ .

Так как невозможно предсказать, при какой полярности заряда облака произойдет грозовой разряд, то при расчетах перенапряжений и токов, протекающих через разрядники, принимаются максимальные параметры тока молнии. Это относится и к максимальной амплитуде тока молнии. Согласно международным нормам считается, что 98 % атмосферных разрядов происходят при токах с амплитудой 200 кА и менее. Как уже отмечалось ранее, при ударах молнии в отдельно стоящие здания с ожидаемым током 200 кА считается, что 50 % этого тока (100 кА, импульс 10/350 мкс) уходит через заземлитель, а остальной ток протекает по электропроводным коммуникациям: провода электроснабжения, водопровод, телефонный кабель и другое (рис. 5.41).

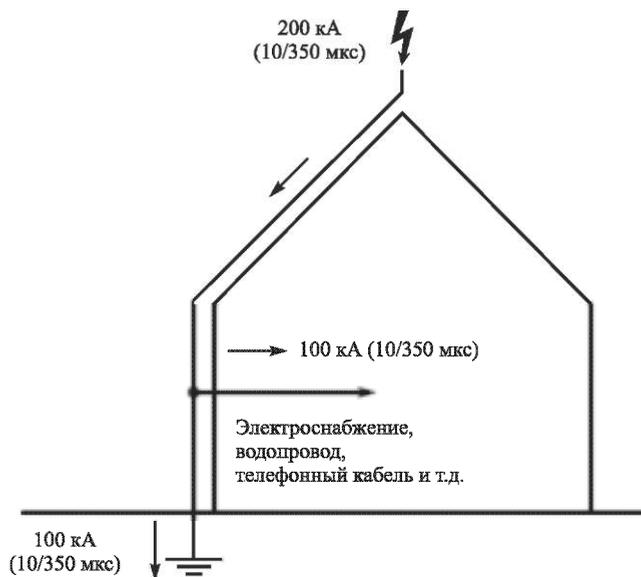
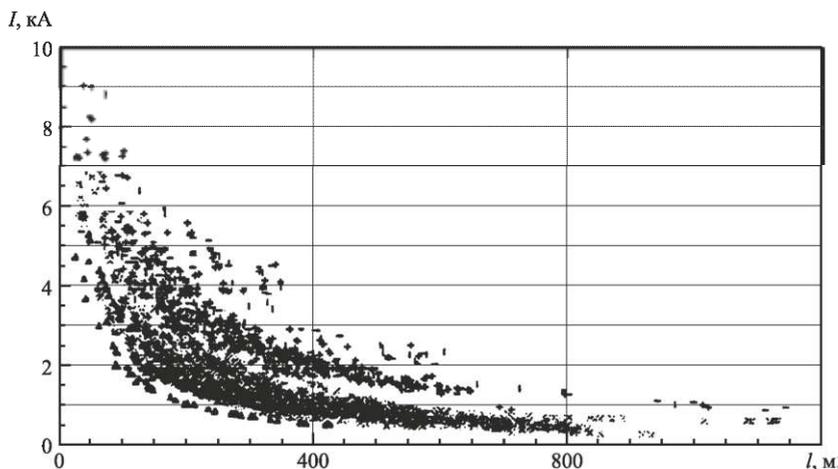


Рис. 5.41. Распределение тока молнии

При этом предполагается, что каждый провод берет на себя соответствующую часть тока. Если есть, например, пять проводов, то в каждом проводе протекает 10 % тока молнии. При наличии водопровода, кабеля электроснабжения и телекоммуникационного кабеля по каждому из них может протекать ток 33 кА. В каждой из этих систем ток распределяется по отдельным проводам равномерно. Например, в трехфазной системе с нейтральным проводом ожидаемый ток в каждом проводе составляет 8,5 кА (импульс 10/350 мкс). В проводах однофазной линии электроснабжения, состоящей из фазного и заземленного проводов, ток в каждом из них может достигать 50 кА (в отсутствие заземления, например, при ударе молнии в здание, расположенное в горной местности).

Вторым важным фактором для выбора разрядника является его способность отключать сопровождающий ток короткого замыкания. Если разрядник сработал в результате удара молнии, то через искровой промежуток протекает ток короткого замыкания, который необходимо отключать. Ожидаемый ток короткого замыкания зависит от параметров сети и места установки разрядников. Данные о токах короткого трехфазного

замыкания в сетях электропитания 380 В в зависимости от расстояния до трансформатора приведены для 29 местных сетей в 2323 точках [31] (рис. 5.42).



**Рис. 5.42. Токи короткого замыкания в реальных сетях в зависимости от удаления  $l$  места короткого замыкания от трансформатора**

Разрядники (см. рис. 5.37 и 5.38) способны отключать токи короткого замыкания (см. рис. 5.42).

### ***Контрольные вопросы для самопроверки***

1. Каковы особенности сетей электроснабжения типа  $TN-S$ ?
2. Каковы особенности сетей электроснабжения типа  $TN-S$ ,  $TN-C-S$ ?
3. Каковы особенности сетей электроснабжения типа  $TT$ ?
4. Каковы особенности сетей электроснабжения типа  $IT$ ?
5. Объясните функции шины  $PAS$ .
6. Проанализируйте схемы защит от перенапряжения в сетях разных типов.
7. Какие элементы для уравнивания потенциалов и ограничения перенапряжений применяют в сетях электроснабжения?
8. Объясните принцип действия варисторов.
9. Назовите параметры разрядников, установленных в сетях электроснабжения.
10. Для чего нужны комбинированные защитные устройства?
11. Какие импульсы токов используют для испытаний защитных устройств?
12. Как используют основные положения зонной концепции ограничения перенапряжений в сетях электроснабжения?
13. Как устанавливают защитные устройства в сетях электроснабжения разных типов?

---

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

---

### 6.1. Общие вопросы обеспечения ЭМС

Вопрос об электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики является достаточно сложным. С его решением связаны проблемы разнообразных электромагнитных явлений, путей распространения кондуктивных и полевых помех, электромагнитной устойчивости различных технических средств и т.д.

Многочисленные инциденты, возникающие из-за несоблюдения на электростанциях электромагнитной совместимости, свидетельствуют об актуальности ее обеспечения. Особое значение приобретает эта проблема для объектов атомной энергетики.

Несмотря на сложность проблемы обеспечения ЭМС можно сформулировать некоторые общие рекомендации и технические предложения, способствующие организации необходимой электромагнитной обстановки (ЭМО) и обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) на объектах атомной энергетики.

Решение проблемы обеспечения электромагнитной совместимости должно начинаться с проектирования объекта. На этой стадии определяют общие вопросы принципиальной схемы объекта, его конструктивные особенности, схемы и устройства управления, регулирования параметров, обеспечения безопасности и многое другое. От исполнения строительных конструкций, первичной и вторичной схем, системы молниезащиты и заземления и многих других факторов зависит электромагнитная обстановка и соблюдение электромагнитной совместимости. Поэтому необходима экспертиза принятых проектных решений по обеспечению электромагнитной совместимости. Такая экспертиза может быть проведена только специалистами в области электромагнитной совместимости.

Подобная экспертиза проектов объектов электроэнергетики, выполняемых зарубежными фирмами, проводится в обязательном порядке.

При проектировании следует использовать зонную концепцию ограничения перенапряжений (гл. 4). В строительной части выделяют зоны, в которых могут быть разные электромагнитные воздействия. Такие, как наружное окружение здания, само здание, отдельные помещения, шкафы управления, конкретные приборы и т.д. Аналогично на зоны могут быть разбиты системы электроснабжения, цепи оперативного тока и др.

На границах зон должны быть предусмотрены технические мероприятия, ограничивающие перенапряжения и помехи до допустимых уровней. В соответствии с этими условиями, при проектировании необходимо выбирать технические средства и группы их исполнения.

Для того чтобы успешно использовать зонную концепцию, необходимо разработать методику. Однако уже сейчас можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Необходимо четко выделить и при проектировании обеспечить наиболее важную границу зон  $0_B-1$ . Это – стены здания, в котором располагается релейная защита, пульта управления и т.д. Стены образуют первый экран с отверстиями, через который по проводам поступают кондуктивные помехи, а через отверстия – полевые помехи, обусловленные внешними источниками, например каналом молнии. Чтобы экран обеспечил максимальное затухание, для этого необходимо все металлические детали (арматуру, металлические коробки окон, дверей, элементы инженерных коммуникаций, трубы, вентиляционные короба и т.д.) многократно электрически соединить друг с другом и с контуром заземления. Никаких металлических, не соединенных с экраном элементов, входящих в здание извне, не должно быть, так как они могут, как антенны излучать электромагнитную энергию во внутрь помещения. Протяженных отверстий в экране также не должно быть, так как они могут работать как щелевые антенны. Следует проанализировать положение всех электрических коммуникаций, входящих в здание и оценить, какие помехи могут поступать по ним. Для снижения помех коммуникации следует выполнять экранированными кабелями с обязательным соединением экрана кабелей и экрана здания кратчайшим путем. С экраном здания должны быть соединены металлические кабельные каналы, лотки, эстакады и т.д.

Особое внимание должно быть уделено связям с измерительными трансформаторами, расположенными на ОРУ. Эти связи необходимо также осуществлять экранированными кабелями и прокладывать отдельно от других кабелей, по которым могут протекать большие коммутационные токи или токи, возникающие от ударов молний или коротких замыканий.

На этой границе может потребоваться установка защитных элементов – разрядников для уравнивания потенциалов или варисторов для снижения перенапряжений.

2. Разрядники необходимо устанавливать непосредственно на входах кабелей в здание, если возможно появление напряжений, превышающих допустимые для зоны 1. Причинами таких напряжений могут быть удары молнии в молниесотводы, в подходящие линии высокого напряжения, коммутации на подстанции, короткие замыкания, отключение индуктивных нагрузок в цепях оперативного тока, обратные переключения и т.д.

Следует также предусматривать защитные мероприятия и на границах других зон. Для снижения перенапряжений на них пригодны варисторы, фильтры, комбинированные устройства, рассмотренные в гл. 5. Выбор таких устройств, координация их параметров и способов установки подлежит исследованию на каждом объекте.

3. В соответствии с инструкциями (руководящими указаниями [15, 17]) должна быть спроектирована и реализована на объекте система молниезащиты, предусмотренные требуемые пути протекания тока молнии и его частей. Вблизи проводов, соединяющих молниеприемники проводов с заземлителем не должны находиться незамкнутые металлические контуры и контуры с ненадежными электрическими соединениями (неплотными контактами). Так, если внутри здания на расстоянии 5 м от спуска, по которому протекает, например, 1/4 тока молнии, находится вертикально расположенный контур площадью 1 м<sup>2</sup>, то в нем при повторном ударе молнии может навестись ЭДС до 2 кВ. Если контур имеет неплотный контакт или зазор порядка 10<sup>-1</sup> мм, то возникает искра, и сам контур будет действовать как мощный источник электромагнитного высокочастотного воздействия на технические средства, расположенные внутри

помещения. Приведенный пример указывает на то, что все металлоконструкции и электрические коммуникации должны быть выполнены тщательно.

Релейные и другие щиты, расположенные в помещении, не должны размещаться вблизи спусков и элементов, по которым возможно протекание тока молнии или его части.

4. Заземлитель электроэнергетического объекта предназначен для обеспечения безопасного обслуживания (снижения напряжения прикосновения и шагового напряжения до безопасных уровней). Однако он играет важную роль и в формировании электромагнитной обстановки. На нем при ударах молнии, коммутациях на стороне высокого напряжения, коротких замыканиях, возможно возникновение высоких потенциалов, обратных перекрытий кабелей вторичных цепей, проложенных непосредственно по заземлителю. В этом случае возможны иные рекомендации по выполнению заземлителя, чем предписанные инструкциями, руководящими документами (например, сокращение расстояний между полосами заземлителя в местах прокладки кабелей вторичных цепей на территории ОРУ).

5. Экспериментальное исследование электромагнитной обстановки на РЩ ОРУ 750 кВ действующего энергоблока АЭС показывает, что в целом ЭМО на РЩ ОРУ может характеризоваться по ГОСТ Р 50746–2000 как обстановка средней степени жесткости.

По результатам исследований снижения уровня помех для получения некоторого запаса по устойчивости оборудования релейного щита к их действию можно дать следующие рекомендации:

- снизить уровень промышленных радиопомех в цепях питания, тока и напряжения микропроцессорной релейной защиты путем, например, установки ферритовых фильтров на кабельных связях или прокладки дополнительных экранированных кабелей в помещении релейного щита при заземлении их с одного конца;
- провести усиление заземляющего устройства, к которому подходят кабели терминалов микропроцессорной релейной защиты, для снижения импульсного сопротивления до 3 Ом;
- провести обследование состояния заземляющих устройств ОРУ, релейного щита, АТ и трансформаторов в полном объеме;
- соблюдать периодичность контроля состояния контура заземления ОРУ.

Для снижения потенциала статического электричества на теле обслуживающего персонала:

- не применять синтетическую одежду при обслуживании электротехнического оборудования в помещении релейного щита, где установлены устройства микропроцессорной релейной защиты;
- осуществить контроль заземления всего металлического и проводящего немагнитного оборудования;
- заземлить по отдельным ответвлениям машины, аппараты и элементы технологического оборудования, являющиеся источниками генерации зарядов статического электричества;
- выполнять напольное покрытие в местах обслуживания микропроцессорной релейной защиты из антистатических материалов.

В связи с тем, что при коммутациях на ОРУ-750, а также при молниевых разрядах или коротких замыканиях на землю амплитудные значения импульсных помех могут превышать значения, установленные для III группы исполнения по ГОСТ Р 50746–2000, применительно к оборудованию систем, важных для безопасности АЭС, рекомендуется перед установкой микропроцессорной релейной защиты выполнить:

- проанализировать сопроводительную техническую документацию, сертификаты и протоколы испытаний микропроцессорной релейной защиты по требованиям ЭМС;
- при несоответствии или неполном соответствии микропроцессорной релейной защиты требованиям III группы исполнения по ГОСТ Р 50746–2000 провести с учетом реальной электромагнитной обстановки испытания микропроцессорной релейной защиты на соответствие приведенным ранее требованиям электромагнитной совместимости в специализированном испытательном центре; проектной и монтажной организациям рекомендуется использовать полученные результаты, с учетом указанных выше мероприятий при проектировании и монтаже терминалов микропроцессорной релейной защиты на АЭС, т.е.:
- применять в проектных решениях только оборудование, имеющее сертификаты соответствия по ЭМС или протоколы результатов испытаний в специализированных испытательных центрах по ЭМС на соответствие требованиям ГОСТ Р 50746–2000 по всем видам воздействий;
- при проектировании электрической части АЭС следует по возможности учитывать требования по разнесению трасс прокладки контрольных, силовых и высокочастотных кабелей;
- применять защитные устройства с более частой заземляющей сеткой;
- выполнить разработку с целью введения в отрасли руководящего документа, регламентирующего требования электромагнитной совместимости при проектировании и реконструкции устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики электрической части энергоблоков АЭС.

Некоторые рекомендации, относящиеся к обеспечению электромагнитной совместимости в цепях оперативного тока, содержатся в п. 1.3.

Далее, рассмотрим подробнее нормированную электромагнитную обстановку в зонах и вопросы молниезащиты базируясь в основном на работы [19–23].

## **6.2. Нормированная электромагнитная обстановка в зданиях и сооружениях, ее обеспечение**

В дополнение к изложенному материалу в гл. 4 приведем рис. 6.1, где условно показаны зоны и параметры электромагнитной обстановки  $U_n$  и  $I_n$  в зонах.

Напряжение  $U_0$  и ток  $I_0$  поступают в зону  $I$  через границу между зонами  $0_A$  или  $0_B$  и  $I$ . При этом имеется в виду, что эта граница может быть между зонами  $0_A$  и  $I$  (в отсутствие молниеотводов защитной зоны), либо между  $0_B$  и  $I$  при наличии специальных молниеотводов или металлических конструкций, выполняющих функцию молниеотводов.

В зоне  $0_A$  возможны следующие токовые воздействия молний:

- импульс 10/350 мкс амплитудой 200; 150 или 100 кА для соответствующих уровней защиты I, II, III–IV;
- импульс 0,25/100 мкс амплитудой 50; 37,5; и 25 кА для уровней защиты I, II, III–IV.

В зоне  $0_B$  возможны токовые импульсы с такими же временными параметрами, но с меньшими амплитудами в зависимости от распределения тока молнии по элементам здания или по приходящим в зону электрическим коммуникациям.

Напряженность магнитного поля  $H_0$  в зонах  $0_A$  и  $0_B$  определяется по закону полного тока при известном токе и расстоянии от точки наблюдения до проводника с полным током молнии или его частью.

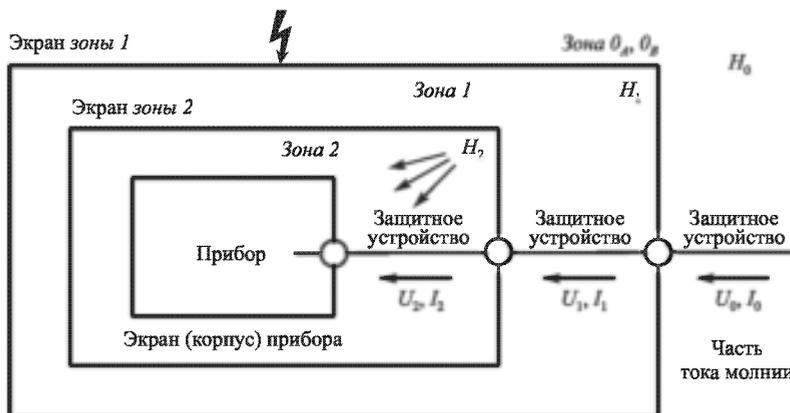


Рис. 6.1. Электромагнитная обстановка в защитных зонах при грозовом разряде

Что касается напряжения в зонах  $\theta_A$  и  $\theta_B$ , то оно определяется произведением тока на активное сопротивление участка цепи, или  $L \cdot dI_0/dt$ , где  $L$  – индуктивность участка цепи с полным током молнии, или его частью, находящейся в зоне  $\theta_B$ . Значение  $U_0$  может достигать многих сотен киловольт.

Нормативные документы [19–23] идентифицируют уровни защиты, категории применяемых в зонах приборов, классы жесткости испытаний.

Так, в зонах  $\theta_A$  и  $\theta_B$  должен быть реализован уровень защиты I, должны устанавливаться приборы категории I, испытанные воздействием класса жесткости I.

Некоторые параметры электромагнитной обстановки в последующих зонах приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

### Нормированная электромагнитная обстановка в зонах

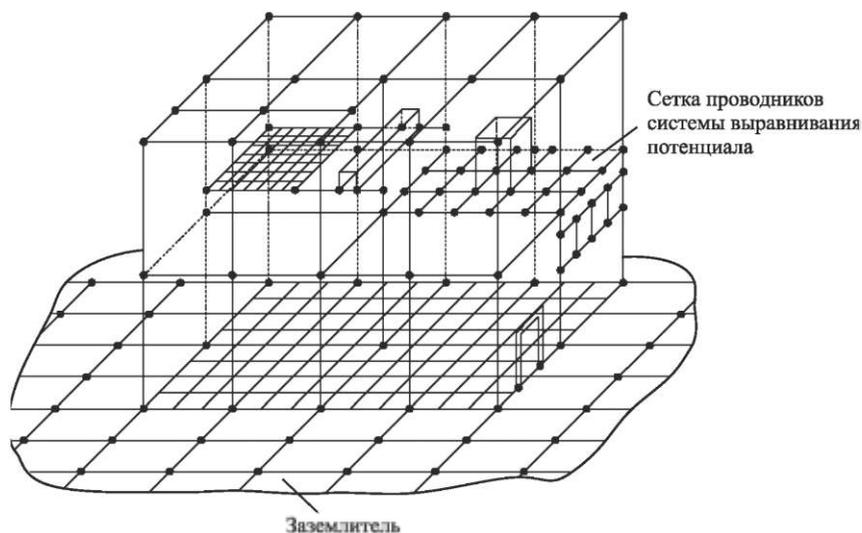
Вид воздействия на прибор	Зоны			
	1	2	3	4
Импульс напряжения 1,2/50 мкс, кВ	4	2	1	0,5
Импульс тока 8/20 мкс, кА	2	1	0,5	0,25
Напряженность магнитного поля при токе 8/20 мкс, А/м	1000	300	100	–
Напряженность магнитного поля при демпфированных колебаниях частоты 1 МГц, А/м	100	30	10	–
Воздействия импульса напряжения 1,2/50 мкс на приборы в сети электропитания, кВ	6	4	2,5	1,5

Как уже отмечалось, границей зон  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  и I являются стены зданий, сооружений. Они кроме своих основных функций играют немаловажную роль и в обеспечении электромагнитной совместимости электрооборудования, установленного внутри зданий, сооружений.

Стены, металлоконструкции, арматура железобетонных конструкций, элементы системы молниезащиты и другое создают экран, ослабляющий полевые помехи, приходящие извне. Присоединение оболочек кабелей к экрану и защитные устройства,

установленные на вводах электрических коммуникаций в здания, ослабляют кондуктивные помехи. Поэтому важным является такое исполнение конструкции зданий, стен и инженерных коммуникаций, чтобы они образовывали экран с предельно возможным затуханием как полевых, так и кондуктивных помех на их пути проникновения в здание.

В дополнение к материалу, изложенному ранее, приведем рис. 6.2 [22].



**Рис. 6.2. Использование арматуры здания, проводников уравнивания потенциала и заземлителя для создания экрана**

Экран образован из электрически связанных между собой металлоконструкций здания, арматурой железобетонных элементов, заземлителем, системой уравнивания потенциалов (см. рис. 6.2) [22]. Рассмотрим подробнее элементы экрана и связи между ними.

Металлические элементы каркасов зданий соединяются сваркой. Они образуют хорошо проводящую пространственную конфигурацию и служат основой экрана.

Железобетонные панели, элементы стен объединяются между собой. Пример соединений железобетонных панелей между собой приведен на рис. 6.3. Если необходимо, панели электрически объединяются друг с другом гибкой связью (рис. 6.4). Для снижения полного сопротивления всей конструкции в целом и улучшения экранирующих свойств сооружения, точки соединения плит друг с другом должны быть на расстояниях не более 1 м как по горизонтали, так и по вертикали.

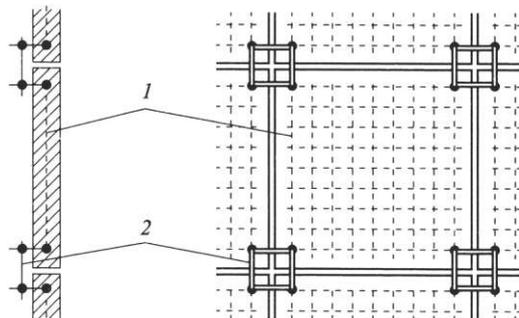
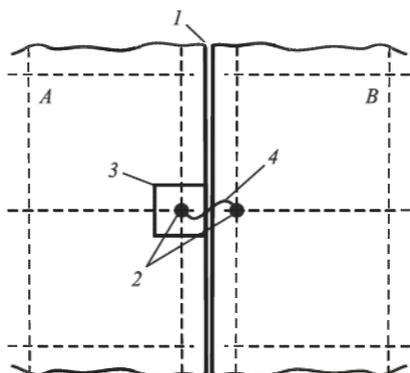
Примеры использования сварных соединений арматуры (если сварка допускается в процессе строительства) показаны на рис. 6.5. Длина сварочного соединения должна быть не менее 30 мм при диаметре стержней арматуры примерно 10 мм.

Болтовые соединения приведены на рис. 6.6. На рис. 6.6а показано соединение стержневых проводников, которое применяется в случаях, когда сварка не допускается или требуется соединить проводники из разных материалов, например из стали и алюминия.

На рис. 6.6б показано болтовое соединение круглого проводника с пластиной и металлической накладкой. Для улучшения контакта накладка может иметь канавку по форме проводника.

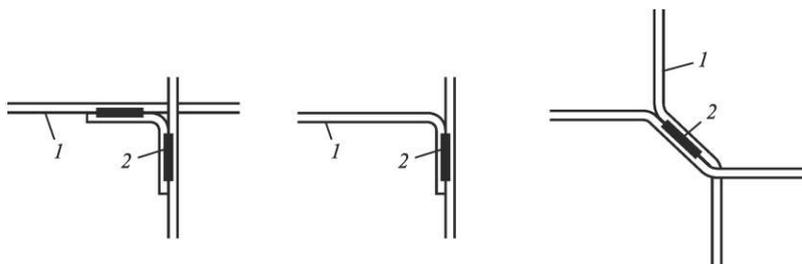
**Рис. 6.3. Монтаж соединительных проводников на плитах из предварительно напряженного железобетона с помощью сварки или болтовых соединений:**

1 – арматура предварительно напряженного железобетона;  
2 – соединительные проводники



**Рис. 6.4. Конструкция гибкой связи между железобетонными плитами:**

1 – зазор между плитами; 2 – сварные или болтовые соединения; 3 – пластина на обратной стороне плиты; 4 – гибкий или изогнутый соединительный проводник (минимальной длины); A, B – железобетонные плиты



**Рис. 6.5. Выполнение сварных соединений арматуры железобетонных конструкций:**

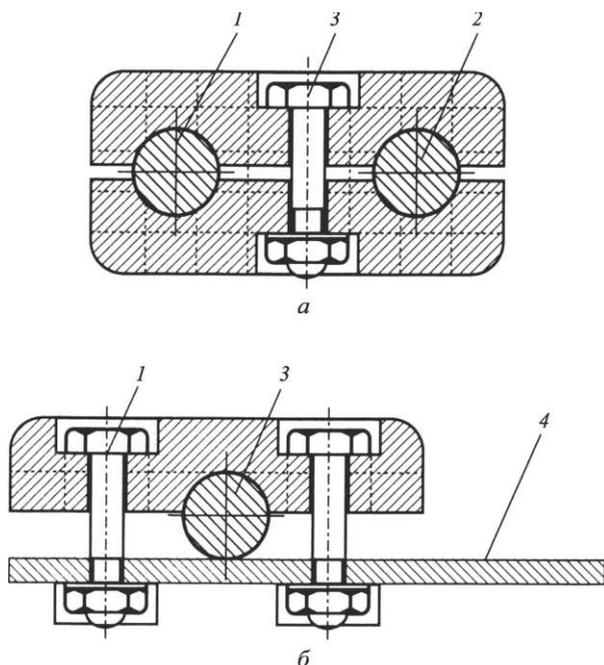
1 – арматура; 2 – сварные швы длиной не менее 30 мм

Гибкими проводниками могут соединяться между собой металлические части фасада (рис. 6.7а). Допускается и жесткое соединение с использованием болтов (рис. 6.7б).

Типовое соединение элементов парапета металлической крыши с помощью гибкого проводника минимальной длины показано на рис. 6.8. При этом особое внимание следует обращать на выбор материала и конструкции присоединений, обеспечивающих их коррозионную стойкость.

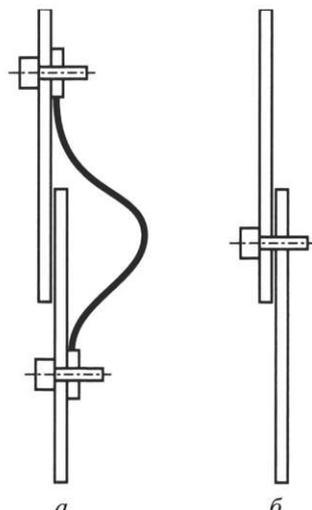
Составной частью экрана является заземлитель. Заземлитель включает в себя фундаментные конструкции, выполняемые, как правило, в виде сетки из арматуры, а также сетки из арматуры или полос в грунте, связанные с глубинными заземляющими электродами. В общем виде сетки заземлителя предприятия могут выглядеть, как показано на рис. 6.9.

Существенно может улучшить экранирующие свойства здания металлический фасад, если он предусмотрен в проекте и правильно выполнены электрические соединения его элементов.



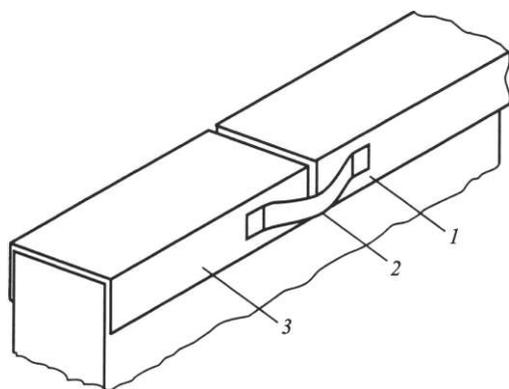
**Рис. 6.6. Примеры выполнения соединений между стержнем арматуры и проводником:**

- 1 – стержень арматуры;
- 2 – проводник круглого сечения;
- 3 – болт; 4 – плоский проводник (шина)



**Рис. 6.7. Соединение металлических частей фасада здания:**

- а – гибким проводом;
- б – болтом



**Рис. 6.8. Типовое соединение элементов металлической крыши (парапета):**

- 1 – коррозионно-стойкое соединение;
- 2 – гибкий проводник минимальной длины;
- 3 – металлическое покрытие парапета

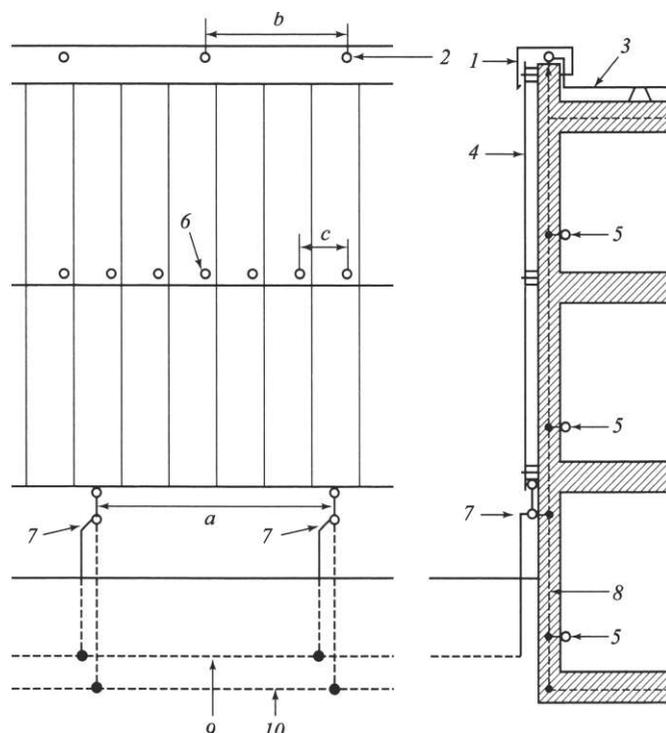
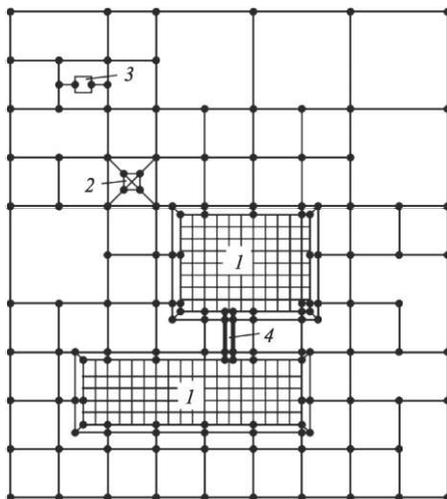
На рис. 6.10 приведен пример таких соединений, а также соединения элементов фасада с арматурой железобетонных панелей, с контуром заземления, шиной уравнивания потенциалов и парапетом крыши.

Следует обратить внимание на соединение полос оконного проема с металлическим покрытием фасада. Рекомендуемые соединения показаны на рис. 6.11.

Каркас здания и арматура железобетонных элементов используются не только для экранирования, но и для уравнивания потенциалов. Для этого они многократно соединяются с шинами PE. Для усиления связи системы уравнивания потенциалов с экраном рекомендуется использовать сетки, накладываемые на стенки из железобетона и многократно соединять их как с арматурой, так и с системой уравнивания потенциалов (рис. 6.12).

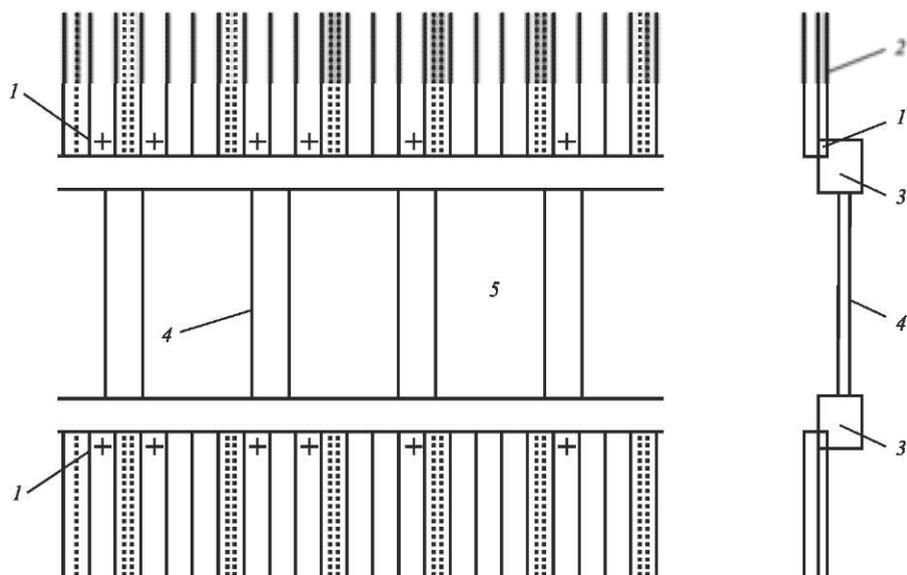
**Рис. 6.9. Сетка заземлителя предприятия:**

- 1 – сетка из арматуры железобетонных конструкций здания;
- 2 – башня на территории предприятия;
- 3 – отдельно стоящее оборудование;
- 4 – кабельный канал



**Рис. 6.10. Использование металлического покрытия фасада в качестве естественной системы отвода тока молнии в железобетонном сооружении:**

1 – металлическое покрытие парапета крыши; 2 – соединение покрытия фасада и парапета (молниеприемника); 3 – горизонтальный провод молниеприемника; 4 – элемент металлического покрытия фасада; 5 – шина выравнивания потенциалов системы молниезащиты; 6 – места креплений покрытия фасада; 7 – контрольные точки; 8 – арматура железобетонных конструкций; 9 – кольцевой заземляющий электрод типа В; 10 – заземляющий электрод в фундаменте. Рекомендуемые размеры  $a = 5$  м,  $b = 3$  м,  $c = 1$  м



**Рис. 6.11. Соединение полос оконного проема с металлическим покрытием фасада:**

1 – соединение пластины элемента фасада с металлической полосой;  
 2 – металлическая пластина фасада; 3 – горизонтальная металлическая полоса;  
 4 – вертикальная металлическая полоса; 5 – окно

Пример комбинированной системы уравнивания потенциалов и многократных соединений корпусов оборудования, инженерных коммуникаций с экраном и заземлителем представлен на рис. 6.13.

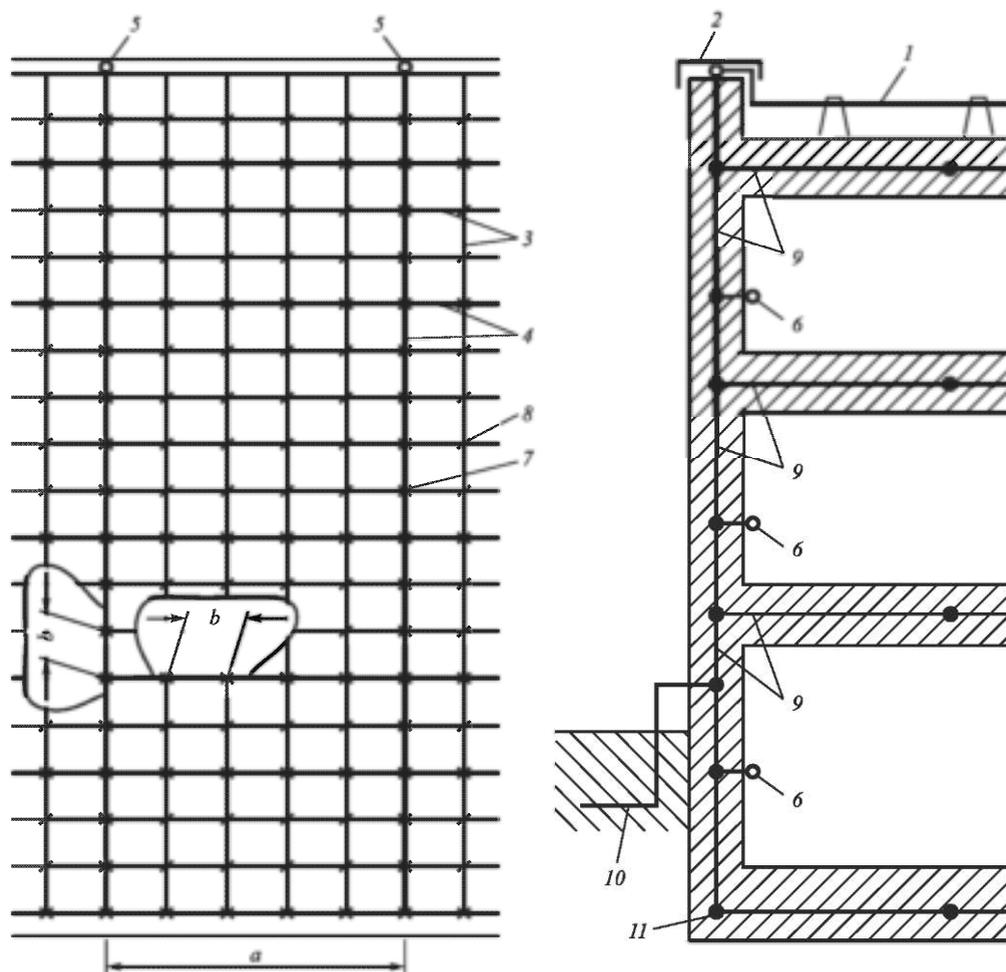
Сами соединения выполняют разными способами (рис. 6.14). Однако конструкция, показанная на рис. 6.14в не является практичной при реализации.

Соединения между элементами каркаса фасада проиллюстрированы рис. 6.15. Соединительные проводники 3 должны иметь минимальную длину. Аналогичным образом может быть создан экран в помещении внутри здания, т.е. образованы зоны 2, 3 и др. Тем самым создается пространство для размещения оборудования внутри зоны  $n$ . Однако оборудование необходимо размещать на некоторых расстояниях от экрана, как показано на рис. 6.16. Эти расстояния  $d_{s/1}$  или  $d_{s/2}$  от экрана до границ пространства  $V_s$  зависят от токов, протекающих по экрану, а также от чувствительности размещаемого электронного оборудования к помехам.

Для того чтобы созданный с учетом приведенных рекомендаций экран здания был эффективным, необходимо соблюдать определенные требования.

В экране здания, сооружения не должно быть больших проемов, щелей, через которые могли бы проникать недопустимые полевые помехи.

В здание, помещение не должны входить металлические конструкции, провода, электрически не связанные с экраном. Связи должны быть выполнены предельно короткими проводниками с обеспечением хороших контактов либо сварными, либо болтовыми соединениями.

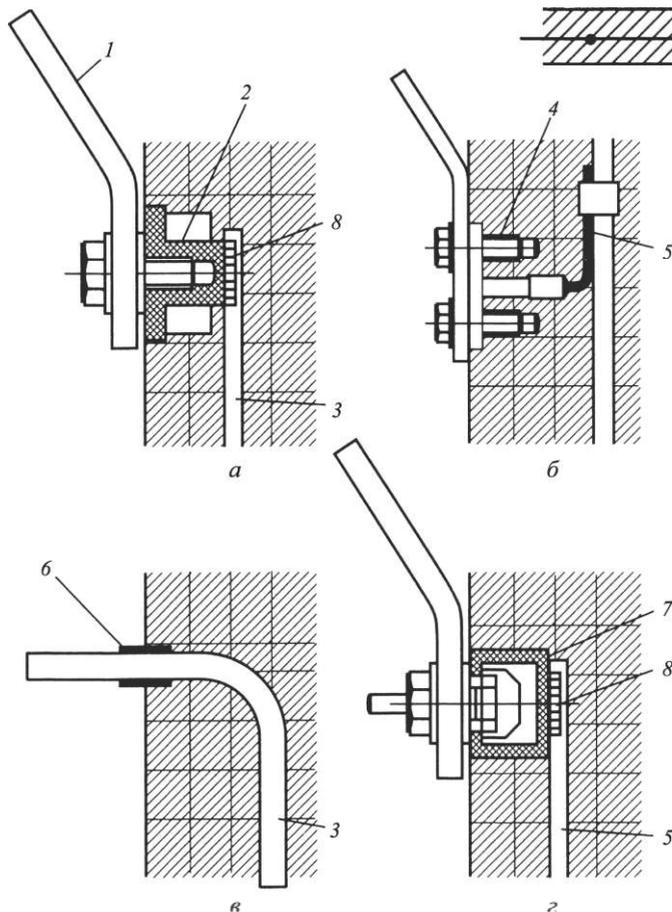
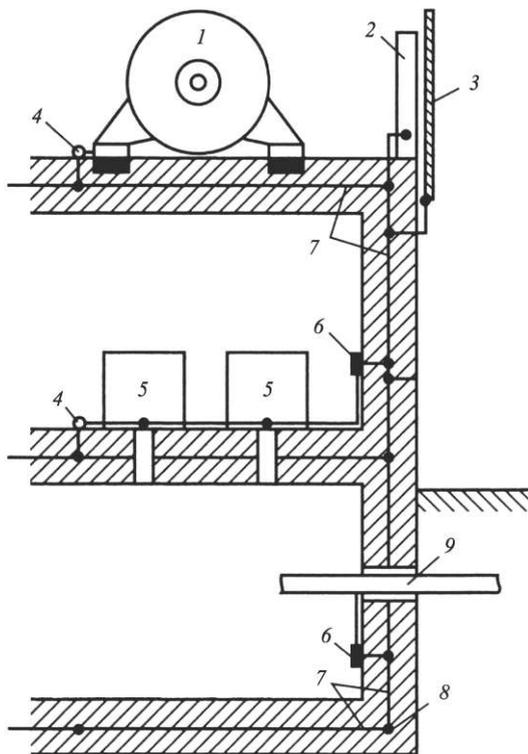


**Рис. 6.12. Использование арматуры для уравнивания потенциалов:**

1 – молниеприемник; 2 – металлическое покрытие парапета крыши; 3 – арматура; 4 – сетка, уложенная на конструкцию из железобетона; 5 – точки соединения сетки с железобетонными конструкциями; 6 – точки соединения с внутренней шиной выравнивания потенциала; 7 – соединение сваркой или зажимом; 8 – соединения любого типа; 9 – арматура железобетона с сеткой; 10 – контур заземления (если имеется); 11 – заземлитель фундамента;  $a = 5$  м – размер ячейки сетки;  $b = 1$  м – расстояние между точками присоединения сетки к арматуре железобетона

**Рис. 6.13. Уравнивание потенциалов в железобетонном сооружении:**

1 – силовое электрическое оборудование; 2 – металлическое ограждение; 3 – металлическое покрытие фасада; 4 – место присоединения; 5 – электрическое или электронное оборудование; 6 – шина заземления; 7 – арматура железобетонных конструкций (со встроенной сеткой из проводников); 8 – элементы заземляющего устройства в фундаменте сооружения; 9 – коммуникационный ввод в здание

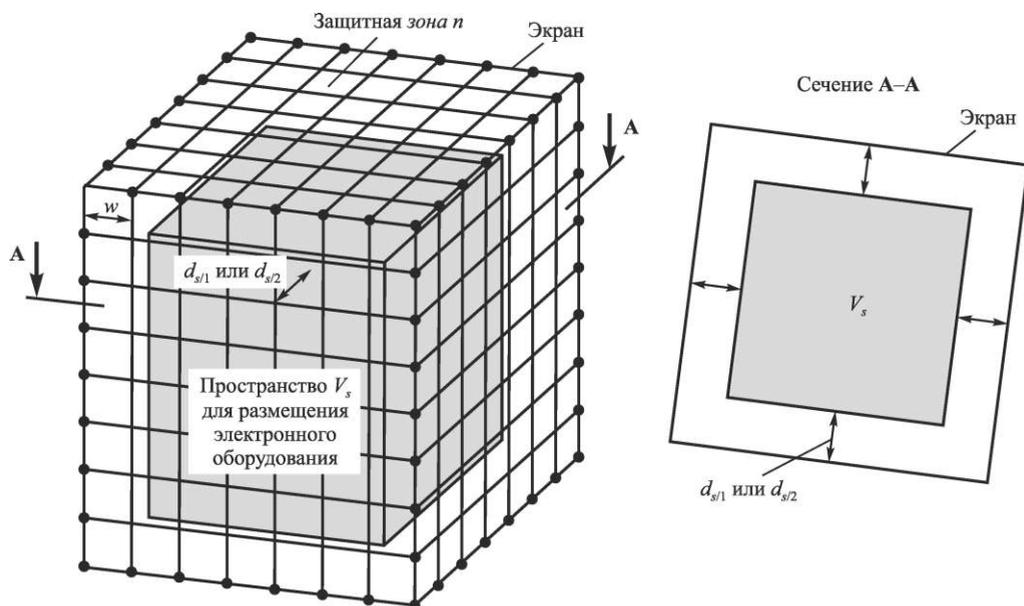
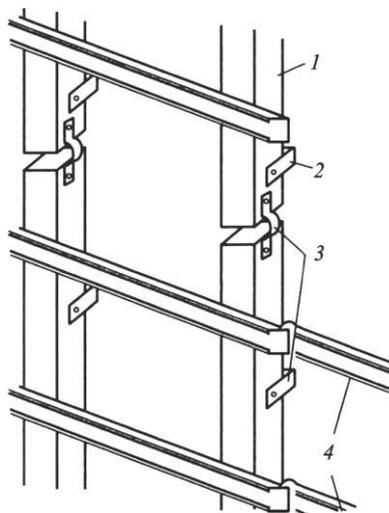


**Рис. 6.14. Примеры присоединения к арматуре железобетонных стен:**

1 – соединительный проводник–шина; 2 – втулка, приваренная к арматуре стены; 3 – круглый соединительный проводник; 4 – отверстие в немагнитном материале для присоединения проводников; 5 – многожильный медный соединительный проводник; 6 – антикоррозионное покрытие; 7 – стальная втулка; 8 – сварка

**Рис. 6.15. Соединения между элементами каркаса фасада:**

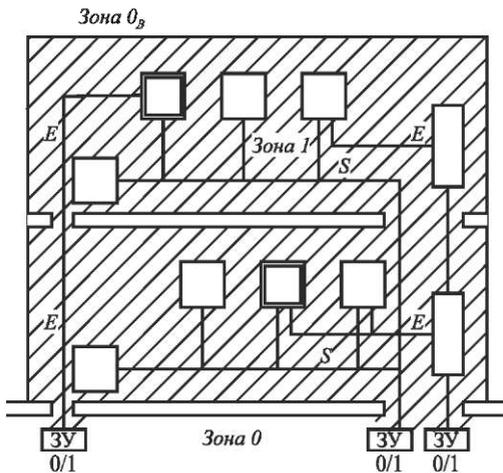
1 – вертикальные элементы каркаса;  
 2 – крепление к стене; 3 – соединительные проводники (минимальной длины); 4 – горизонтальные элементы каркаса



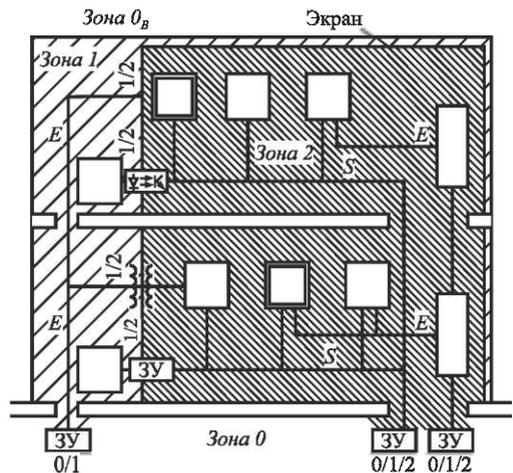
**Рис. 6.16. Пространство  $V_s$  для размещения электротехнического и электронного оборудования в защитной зоне  $n$**

### **6.3. Размещение приборов и координация параметров защитных устройств**

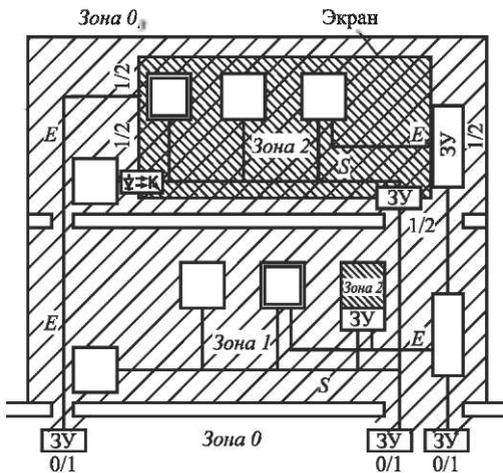
Пример расположения приборов, оборудования в неэкранированной зоне 1 приведен на рис. 6.17, а при организованной зоне 2 – на рис. 6.18. Экран зоны 2 может быть частичным. Локальные и небольшие зоны 2 условно показаны на рис. 6.19, а несколько зон 2 – на рис. 6.20.



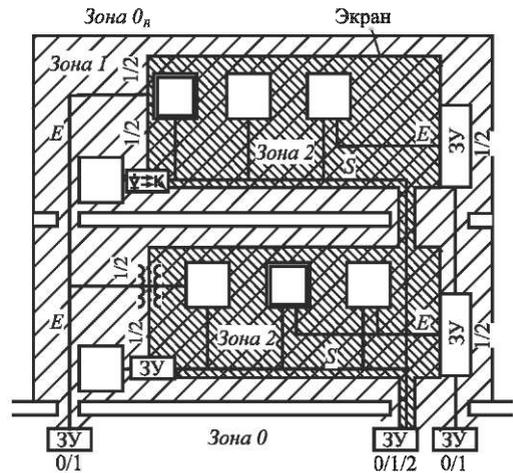
**Рис. 6.17. Незащищенная защитная зона 1 для электронных устройств, устойчивых к помехам:**  
*E* – заземление; ЗУ – защитное устройство;  
*S* – сигнальные линии



**Рис. 6.18. Защитная зона 2 для чувствительных к помехам электронных устройств (обозначения по рис. 6.17)**



**Рис. 6.19. Локальные и небольшие защитные зоны 2 для размещения чувствительных электронных устройств (обозначения по рис. 6.17)**



**Рис. 6.20. Расположение нескольких защитных зон 2 для чувствительных электронных устройств (обозначение по рис. 6.17)**

На рис. 6.21 показана общая картина обеспечения молниезащиты и электромагнитной совместимости административного здания, а на рис. 6.22 – зоны и защитные устройства в сети электропитания.

На границах зон располагаются защитные устройства, обзор которых был приведен ранее. Напомним схему замещения комбинированного защитного устройства, которую будем использовать при рассмотрении вопросов координации параметров элементов комбинированного защитного устройства (рис. 6.23).

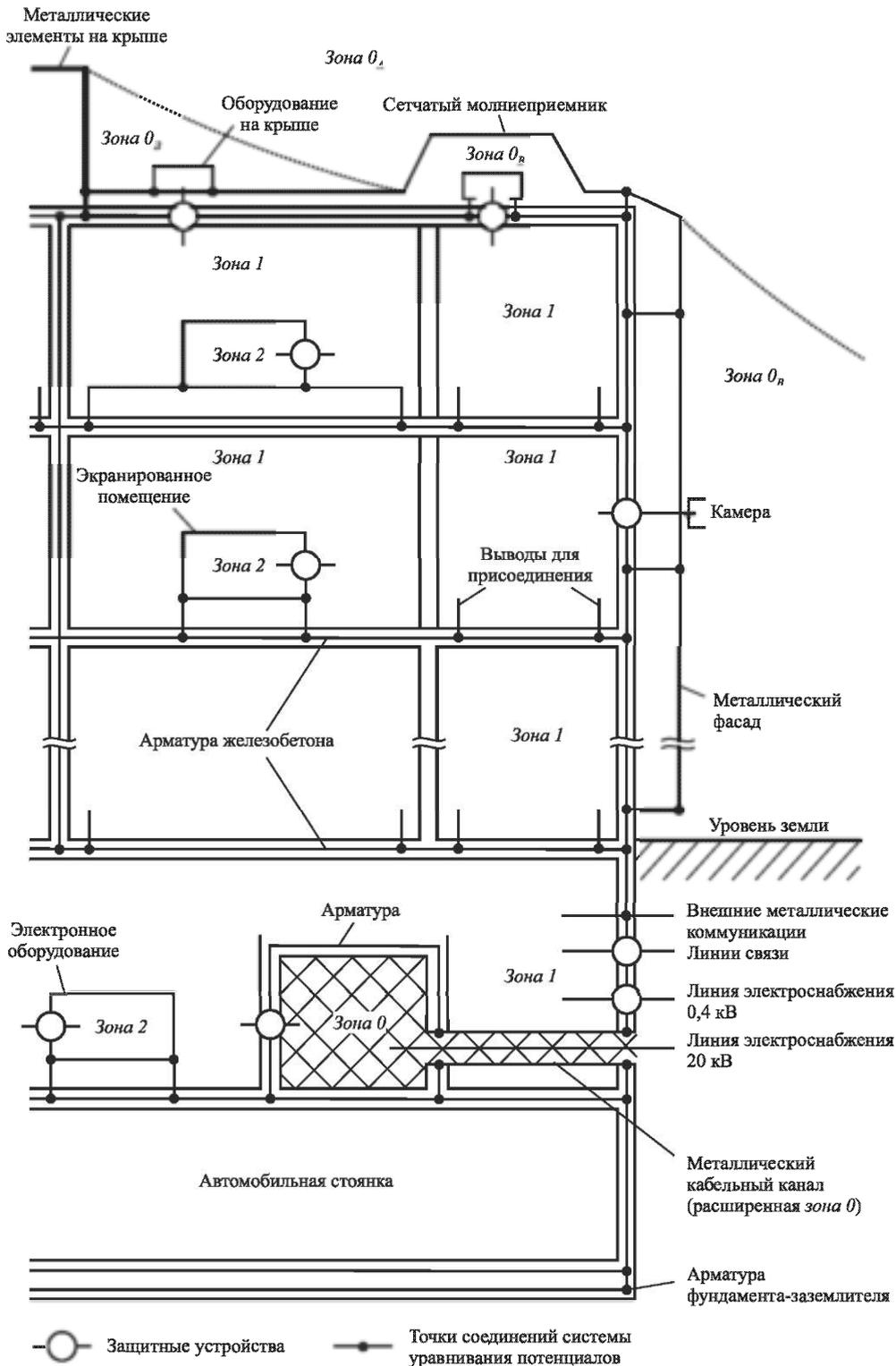


Рис. 6.21. Мероприятия по обеспечению молниезащиты административного здания

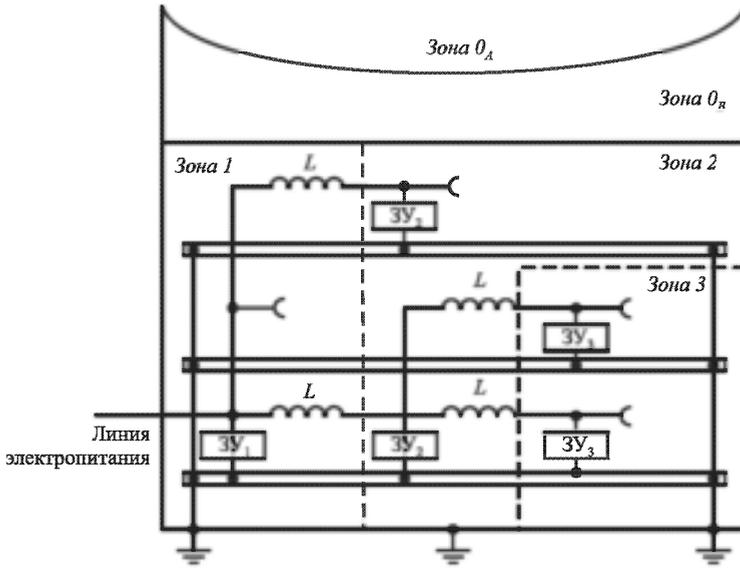


Рис. 6.22. Пример использования защитных устройств в сетях электропитания

Рис. 6.23. Координация параметров защитных устройств  $ZУ_1$  и  $ZУ_2$

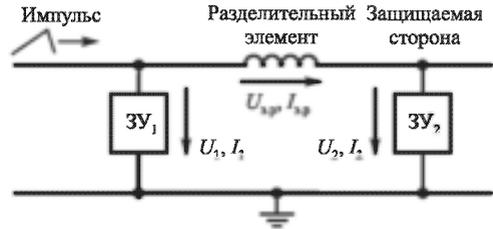
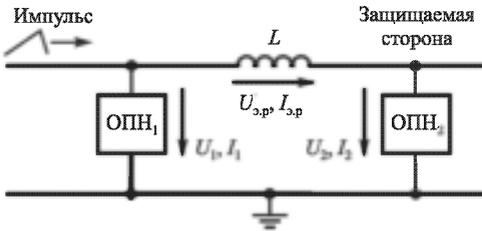


Рис. 6.24. Цепь с устройствами защиты типа ОПН:

ОПН1, ОПН2 – варисторы

Защитными устройствами  $ZУ_1$  или  $ZУ_2$  могут быть варисторы или разрядник и варистор. На рис. 6.24 приведена схема с двумя нелинейными ограничителями перенапряжений ( $ОПН_1$  и  $ОПН_2$ ) и разделительной катушкой индуктивности. Зависимости выделившейся в ОПН энергии от тока импульса показаны на рис. 6.25, вольт-амперные характеристики с указанием максимальных импульсных токов – на рис. 6.26, а на рис. 6.27 – напряжения и токи, протекающие через  $ОПН_1$  и  $ОПН_2$ . На рис. 6.28 показаны аналогичные характеристики при использовании в качестве  $ZУ_1$  разрядника и  $ZУ_2$  – варистора (схема – рис. 6.29) в случае, когда разрядник не срабатывает, а на рис. 6.30 – в случае, когда разрядник срабатывает. Зависимости энергии, выделившейся в разряднике  $P$  и варисторе  $B$  от тока в обоих случаях, показаны на рис. 6.31.

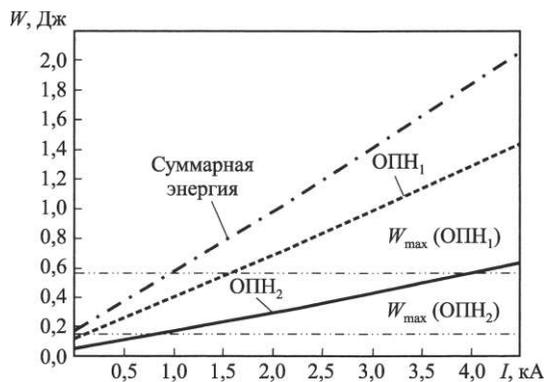


Рис. 6.25. Зависимости выделяемой в варисторах энергии  $W$  от тока импульса  $I$

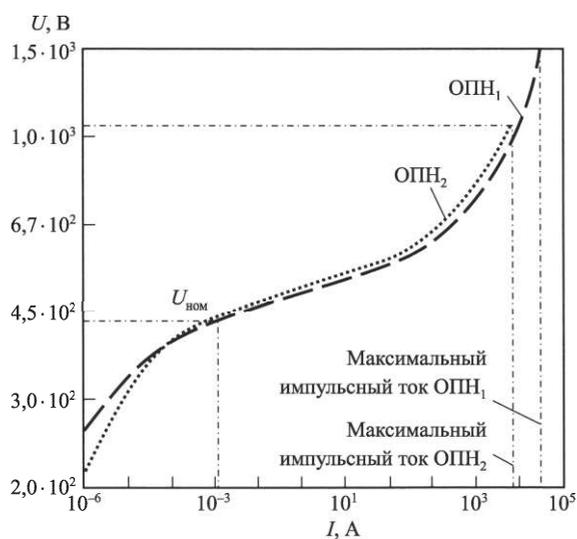


Рис. 6.26. Пример вольт-амперных характеристик ограничителей напряжения ОПН<sub>1</sub> и ОПН<sub>2</sub>

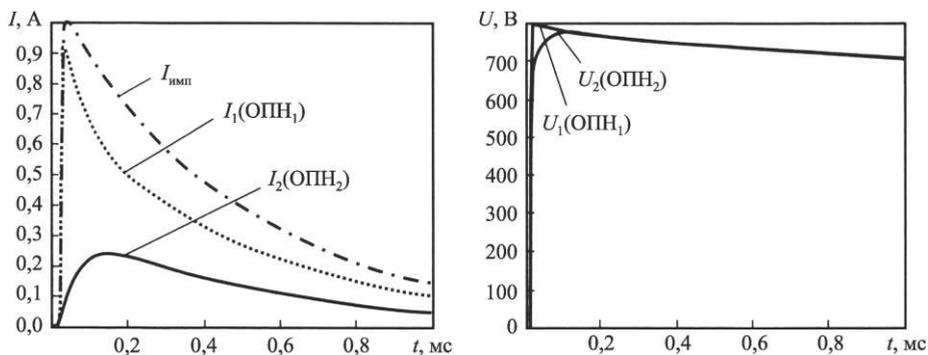


Рис. 6.27. Импульсные характеристики ОПН<sub>1</sub> и ОПН<sub>2</sub> при импульсе тока 10/350 мкс

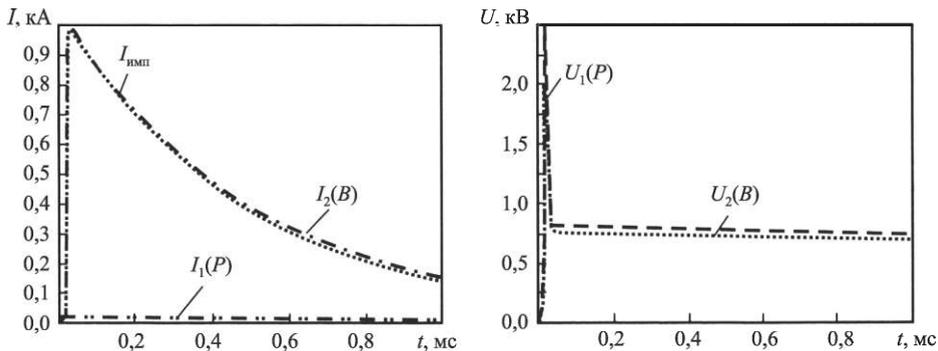


Рис. 6.28. Характеристики защитного устройства с разрядником  $P$  и варистором  $B$  (разрядник не срабатывает)

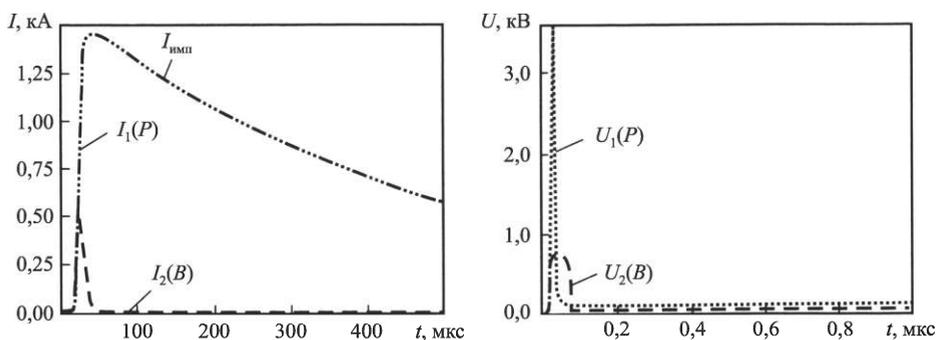


Рис. 6.29. Характеристики защитного устройства с разрядником  $P$  и варистором  $B$  (разрядник срабатывает)

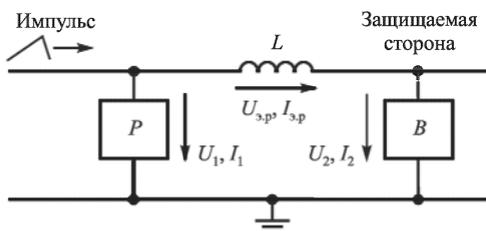


Рис. 6.30. Цепь с разрядником  $P$  и варистором  $B$

Определенные требования предъявляются и к разделительному элементу, рассмотрим их. При выполнении удовлетворительной координации срабатывание разрядника происходит при допустимой рассеиваемой энергии в варисторе ( $B$ ). Напряжение

$$U_1 = U_2 + U_{\text{э,р}} = L \frac{dI}{dt}.$$

Обозначим напряжение срабатывания разрядника  $U_{\text{пр}}$ , тогда индуктивность элемента развязки

$$L_{\text{р.э}} = \frac{U_{\text{пр}} - U_2}{\frac{dI}{dt}}.$$

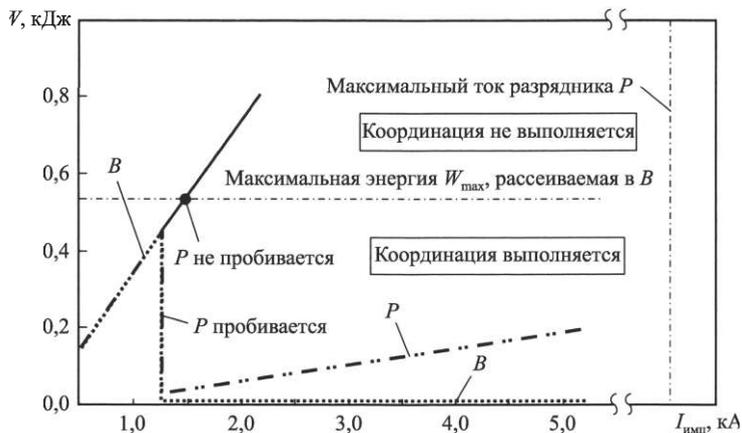


Рис. 6.31. Зависимости выделяемой энергии от импульсного тока  $I_{\text{имп}}$

Следует выбирать бóльшую индуктивность разделительного элемента из двух рассчитанных случаев (для тока 10/350 мкс и с крутизной  $dI/dt$ ).

На рис. 6.32 показан примерный вид вольт-амперных и вольт-секундных характеристик защитных элементов.

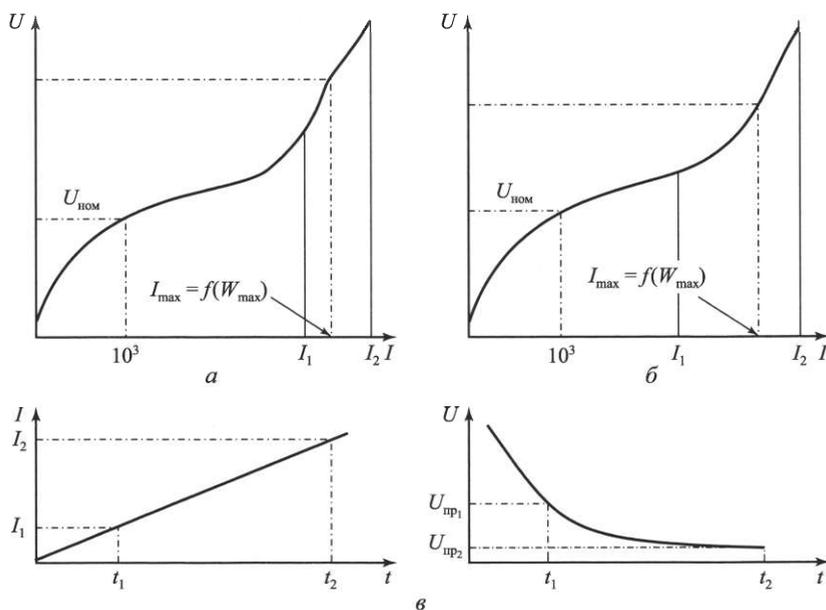


Рис. 6.32. Вольт-амперные и вольт-секундные характеристики защитных устройств (схема, рис. 6.30):

$a$  – вольт-амперная характеристика ОПН при импульсе 10/350 мкс

( $I_1 < I_{\text{max}}$  при  $L_{\text{э.р-1}} \geq L_{\text{э.р-10/350}}$ ;  $I_2 > I_{\text{max}}$  при  $L_{\text{э.р-2}} \leq L_{\text{э.р-10/350}}$ );

$б$  – вольт-амперная характеристика ОПН при косоугольном импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс

( $I_1 < I_{\text{max}}$  при  $L_{\text{э.р-1}} \geq L_{\text{э.р-0,1}}$ ;  $I_2 > I_{\text{max}}$  при  $L_{\text{э.р-2}} \leq L_{\text{э.р-0,1}}$ );

$в$  – зависимости тока во времени и вольт-секундная характеристика разрядника при косоугольном импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс

На рис. 6.33–6.36 приведены энергетические характеристики защитного устройства в случаях несрабатывания и срабатывания разрядника при разных  $L_{\text{э.р}}$ .

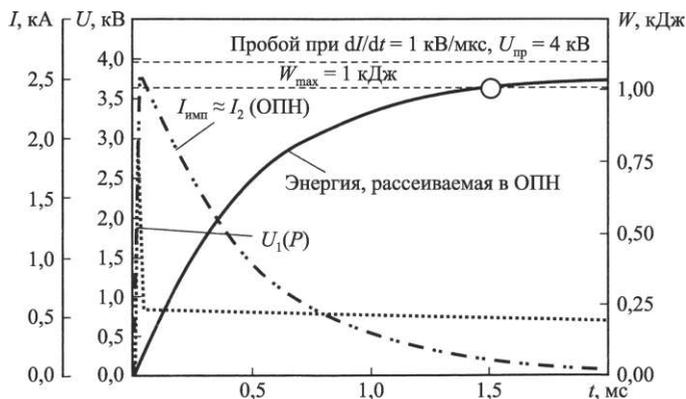


Рис. 6.33. Характеристика защитного устройства (разрядник не срабатывает) при  $L_{з,р} = 8$  мкГн и импульсе 10/350 мкс (схема, рис. 6.30)

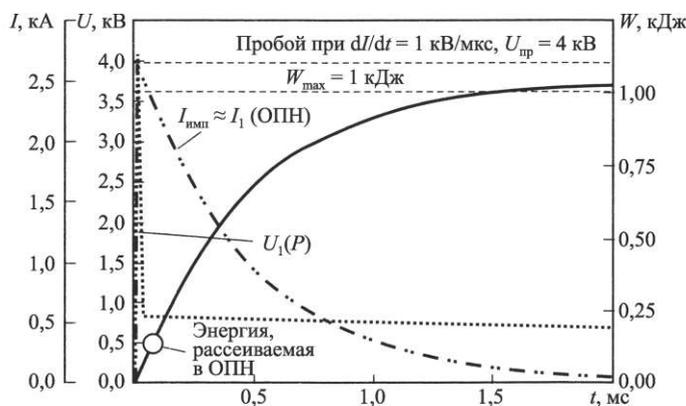


Рис. 6.34. Характеристика защитного устройства (разрядник срабатывает) при  $L_{з,р} = 10$  мкГн и импульсе 10/350 мкс (схема, рис. 6.30)

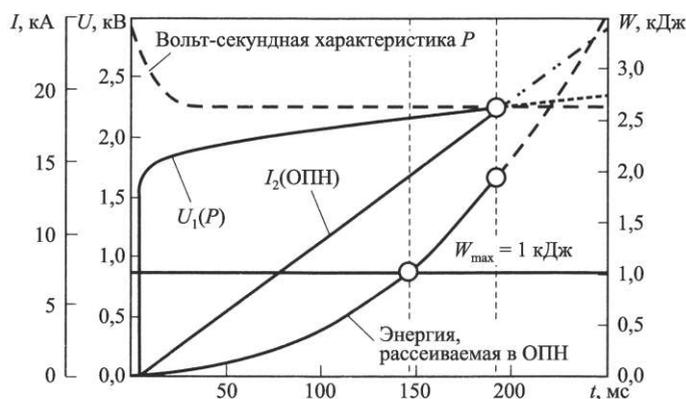
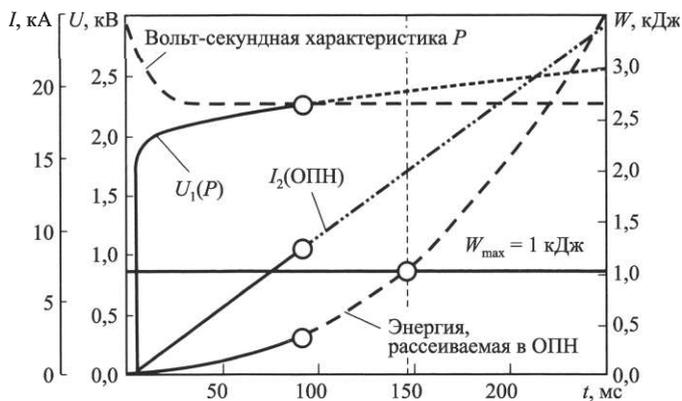
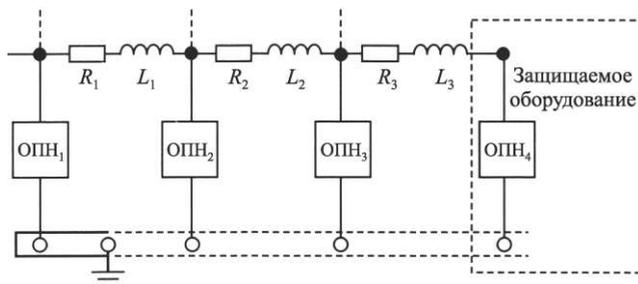


Рис. 6.35. Характеристика защитного устройства (разрядник срабатывает слишком поздно) при  $L_{з,р} = 10$  мкГн и импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс (схема, рис. 6.30)

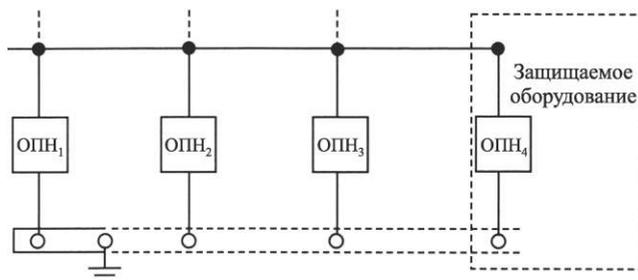


**Рис. 6.36.** Характеристика защитного устройства (разрядник срабатывает своевременно) при  $L_{з,р} = 12 \text{ мкГн}$  и импульсе с крутизной  $0,1 \text{ кА/мкс}$  (схема, рис. 6.30)

На рис. 6.37–6.39 показаны схемы защитных устройств с большим количеством защитных элементов, в которых значения сопротивлений и индуктивности должны быть скоординированы аналогичным образом с характеристиками защитных элементов.



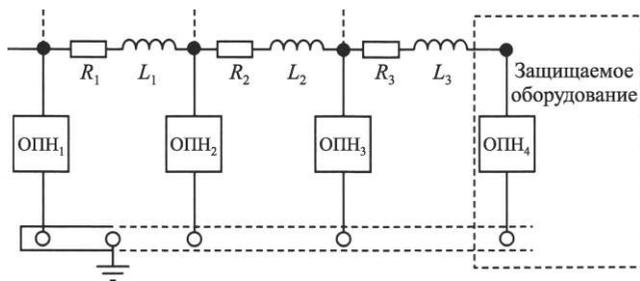
**Рис. 6.37.** Схема координации характеристик защитного устройства с несколькими ОПН и одинаковым остающимся напряжением



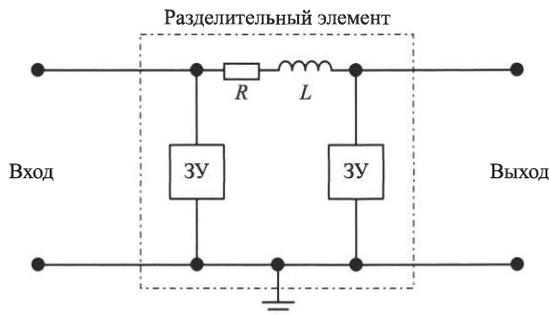
**Рис. 6.38.** Схема координации нескольких ОПН с разными остающимися напряжениями ( $U_{ост1} < U_{ост2} < U_{ост3}$ )

Схема защитного устройства ЗУ с разделительным элементом  $RL$  приведена на рис. 6.40. Последовательно включенный резистор  $R$  или катушка индуктивности  $L$  могут отсутствовать, если координация осуществляется по выделившейся в ЗУ

энергии другими средствами, например, с использованием вольт-секундных характеристик или управляемым включением ступени грубой защиты (разрядника).

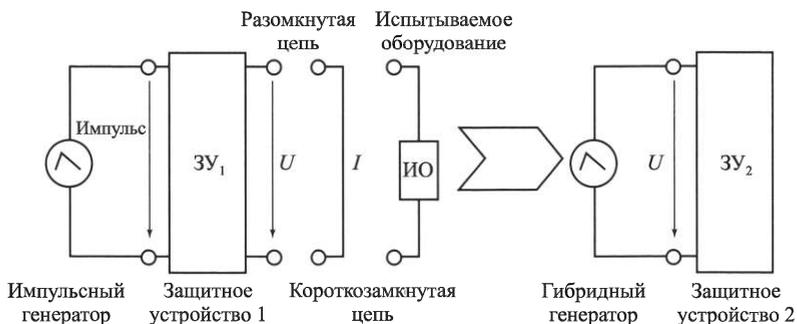


**Рис. 6.39.** Схема координации разрядника и нескольких ОПН с одинаковыми остающимися напряжениями



**Рис. 6.40.** Защитное устройство с двумя ограничителями в одном корпусе

Преобразование импульсов напряжения холостого хода  $1,2/50$  мкс в импульс тока  $8/20$  мкс происходит при срабатывании ступени грубой защиты (рис. 6.41).



**Рис. 6.41.** Координация в соответствии с энергетическим методом

Ранее достаточно подробно описаны защитные устройства, ограничивающие электромагнитные воздействия на технические средства, установленные в той или иной зоне. К таким устройствам относятся варисторы, ограничивающие перенапряжения, разрядники, уравнивающие потенциалы, диоды, фильтры, комбинированные устройства, выполняющие функции тонкой и грубой защиты.

В сетях электроснабжения при использовании разрядников традиционного исполнения возникает проблема гашения дуги короткого замыкания. При монтаже разрядников в распределительных щитах необходимо учитывать выхлоп, выброс плазмы, и в зоне выброса не допускается нахождение шин, проводов, других защитных устройств. Фирмами Leutron (ФРГ), Hakel (Греция), а также и другими изготовителями применяются герметичные многоазорные разрядники с 12 последовательно соединенными электродами, заполненные инертным газом, что обуславливает новые свойства защитных устройств, содержащих такие разрядники. Использование варисторов, присоединенных параллельно таким разрядникам, обеспечивает следующий алгоритм работы.

При появлении импульса перенапряжения ток протекает через варистор. При достижении тока примерно 4 кА остающееся напряжение на варисторе достигает напряжения пробоя разрядника. Разрядник пробивается, и в нем образуются 11 последовательно соединенных каналов разряда.

В каждом канале имеются приэлектродные падения напряжения величиной примерно 15 В. Таким образом, на разряднике существует падение напряжения  $\sim 165$  В, что ограничивает ток замыкания сети электропитания и облегчает гашение дуги с сопровождающим током.

Таким образом, использование защитных устройств с герметическим многоазорным разрядником на границах зон сети электроснабжения обеспечивает как ограничение перенапряжений, так и отключение тока замыкания сети в момент первого перехода тока через нуль, т.е. ток замыкания протекает не дольше 10 мс.

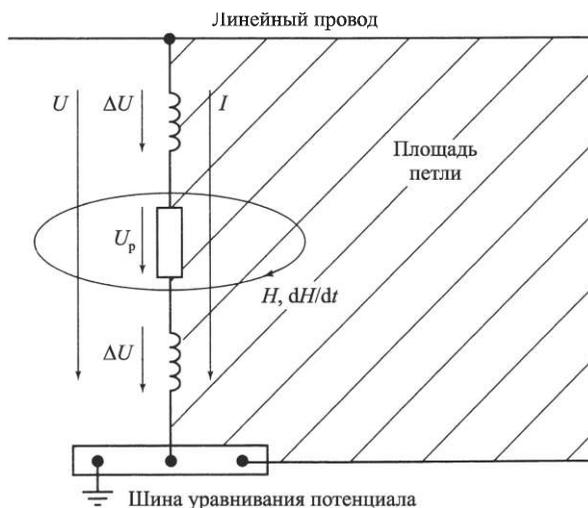
Эти же разрядники способны пропускать импульсы тока 10/350 мкс амплитудой до 100 кА, т.е. они могут использоваться для уравнивания потенциалов в зонах  $\theta_A$  и  $\theta_B$ .

#### **6.4. Особенности использования варисторов для ограничения перенапряжений**

Остающееся напряжение на варисторе при протекании по нему импульсного тока является одним из важнейших параметров защитных устройств, ограничивающих перенапряжения при обеспечении ЭМС. Принято считать, что оно определяется вольт-амперной характеристикой варистора. Падение напряжения в цепи присоединения варистора зависит от индуктивности соединительных проводов (рис. 6.42). При этом падение напряжения на индуктивности наибольшее при высокой крутизне тока, т.е. в течение фронта импульса тока. Немногие непосредственные измерения напряжения показали, что имеет место не только индуктивная составляющая на фронте импульса остающегося напряжения, но и более существенные выбросы позднее фронта импульса тока. Поэтому были проведены измерения этих выбросов.

Исследования проводились на имитаторе тока молнии, описанном в [1]. Для проведения экспериментов выбран импульс тока 10/350 мкс, характерный для молний, развивающихся с положительно заряженного облака и обладающий наибольшей удельной энергией  $\int i^2 dt$ . Объект исследования – варистор Protec BR 150/320 фирмы «Искра Защита», (Словения). Импульс тока удовлетворял требованиям МЭК [19].

Измерения тока выполнялись с помощью трубчатого шунта сопротивлением 0,33 мОм. Малоискажающий активный делитель напряжения присоединялся к участку разрядного контура, содержащему исследуемый варистор. Этот участок включал в себя также шунт, соединительные провода и контактные соединения. Общая длина участка составляла около 30 см.

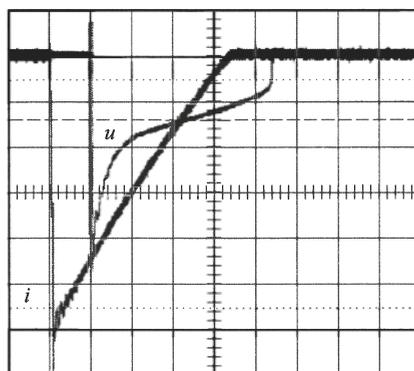


**Рис. 6.42. Импульсные напряжения на участках подключения защитного устройства:**

$I$  – часть тока молнии;  $U$  – импульсное напряжение между проводом фазы и шиной уравнивания потенциалов;  $U_p$  – напряжение на защитном устройстве;  $\Delta U$  – индуктивное падение напряжения на соединительных проводах;  $H, dH/dt$  – напряженность магнитного поля и ее производная по времени

При измерениях использовался цифровой осциллограф фирмы Le Croy LT342 с полосой пропускания 500 МГц.

Осциллограммы тока  $i$  и напряжения  $u$  приведены на рис. 6.43. Осциллограмма напряжения для удобства обработки смещена относительно осциллограммы тока на одно деление. Амплитуда тока составила 20,3 кА. Спад тока практически линейный. Напряжение на варисторе спустя 400 мкс от начала импульса напряжения равно 1050 В. Импульс напряжения имеет выброс при меньших временах.



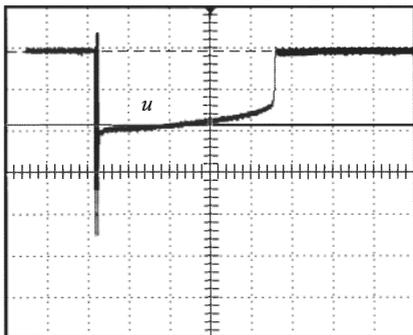
**Рис. 6.43. Осциллограммы тока  $i$  и напряжения  $u$ :**

$m_i$  – 3,7 кА/дел.;  $m_u$  – 800 В/дел.;  $t_i$  – 200 мкс/дел.

При тех же условиях снята осциллограмма импульса напряжения с помощью зонда Tektronix P6015A, имеющего коэффициент деления 1000, входную емкость 3 пФ, сопротивление 100 МОм. Зонд подключался непосредственно к зажимам варистора. Сигнал с зонда регистрировался осциллографом Tektronix TDS 3012 с полосой

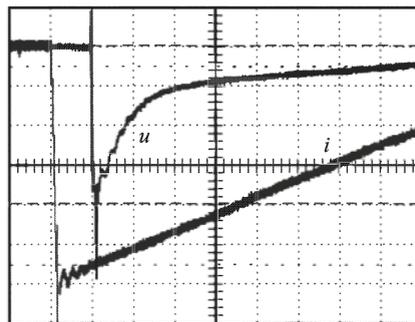
пропускания 100 МГц. Осциллограф с источником питания был установлен на изоляционной подставке и не имел соединения с землей, за исключением соединения зонда.

Осциллограммы напряжения на варисторе приведены на рис. 6.44 и 6.45. Напряжение на варисторе остается практически неизменным во время действия импульса тока (рис. 6.44). На рис. 6.45 заметно увеличение напряжения в течение фронта за счет взаимной индуктивности разрядного контура генератора и контура присоединения зонда к варистору. Разница в импульсах напряжения (см. рис. 6.43 и 6.44) связана с влиянием активного нелинейного сопротивления токовой части контура присоединения делителя. Оно уменьшается во времени, что, вероятно, связано с поверхностным эффектом и проникновением электромагнитной волны в металлические элементы токовой части контура.



**Рис. 6.44. Осциллограмма напряжения  $u$  на варисторе:**

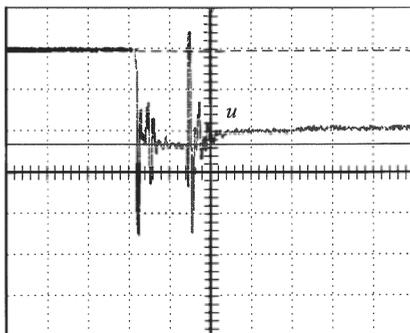
$m_u = 800$  В/дел.;  $m_t = 200$  мкс/дел.



**Рис. 6.45. Осциллограмма напряжения  $u$  на варисторе:**

$m_i = 3,7$  кА/дел.;  $m_u = 800$  В/дел.;  
 $m_t = 10$  мкс/дел.

Для подтверждения этого на рис. 6.46 приведена осциллограмма напряжения на коротке, представляющей собой медный многожильный провод сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  и длиной 23 см.



**Рис. 6.46. Осциллограммы тока  $i$  и напряжения  $u$  при коротке:**

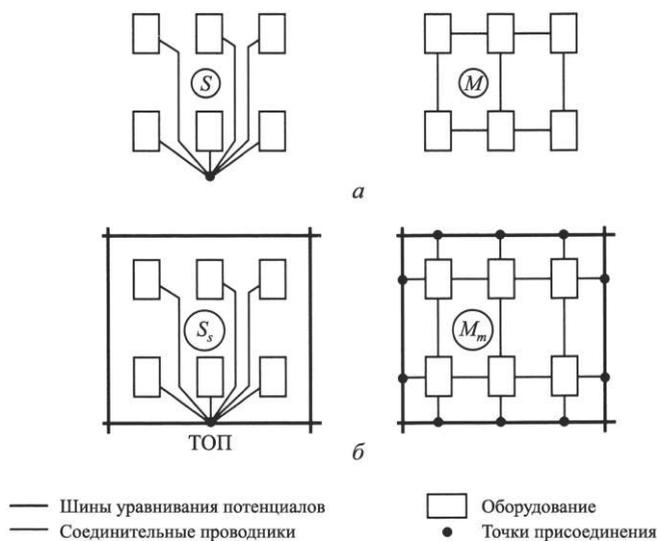
$m_u = 800$  В/дел.;  $m_t = \pm 10$  мкс/дел.

Таким образом, напряжение в схемах с варисторами определяется не только остающимся напряжением на варисторе, но и падениями напряжения на соединительных проводах, контактах. В некоторых случаях эти напряжения могут быть соизмеримы.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать: присоединение защитного варистора к линейному проводу и шине  $PE$  или к нейтральному проводу должно выполняться предельно короткими проводами для того, чтобы уменьшить как индуктивное падение напряжения на них, так и активное падение с учетом проникновения электромагнитного поля в соединительные провода. Это означает, что целесообразно на защитных устройствах предусматривать два контактных присоединения не только линейных проводов (как это предусмотрено некоторыми производителями защитных устройств, крепящихся на стандартной DIN-рейке в шкафах), но и для присоединения к шине  $PE$  или к нейтральному проводу  $N$ .

## 6.5. Обеспечение электромагнитной совместимости внутри зон

Для обеспечения электромагнитной совместимости внутри зон необходимо также соблюдать определенные требования. Корпуса электрических и электронных приборов должны быть объединены между собой, связаны с экраном защитной зоны. Основными конфигурациями таких соединений являются звездообразная и сетчатая (рис. 6.47). В пределах одной зоны могут использоваться обе конфигурации (рис. 6.48).



**Рис. 6.47. Присоединение корпусов электронного оборудования к системе уравнивания потенциалов:**

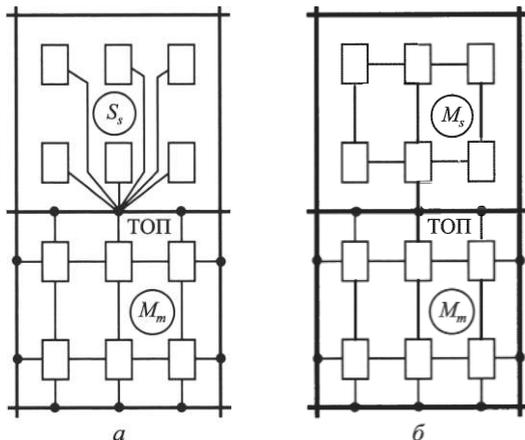
$a$  – основные конфигурации;  $b$  – присоединение к системе выравнивания потенциалов;  
ТОП – общая точка присоединений;  $S, S_s$  – звездообразные конфигурации;  
 $M, M_m$  – конфигурации в виде сетки

Предпочтительным является объединение корпусов в виде звезды с общей точкой на экране зоны.

Типичный вариант присоединений к шине  $PE$  внутри здания приведен на рис. 6.49, а расположения щитков (клеммников) шин  $PE$  – на рис. 6.50–6.52.

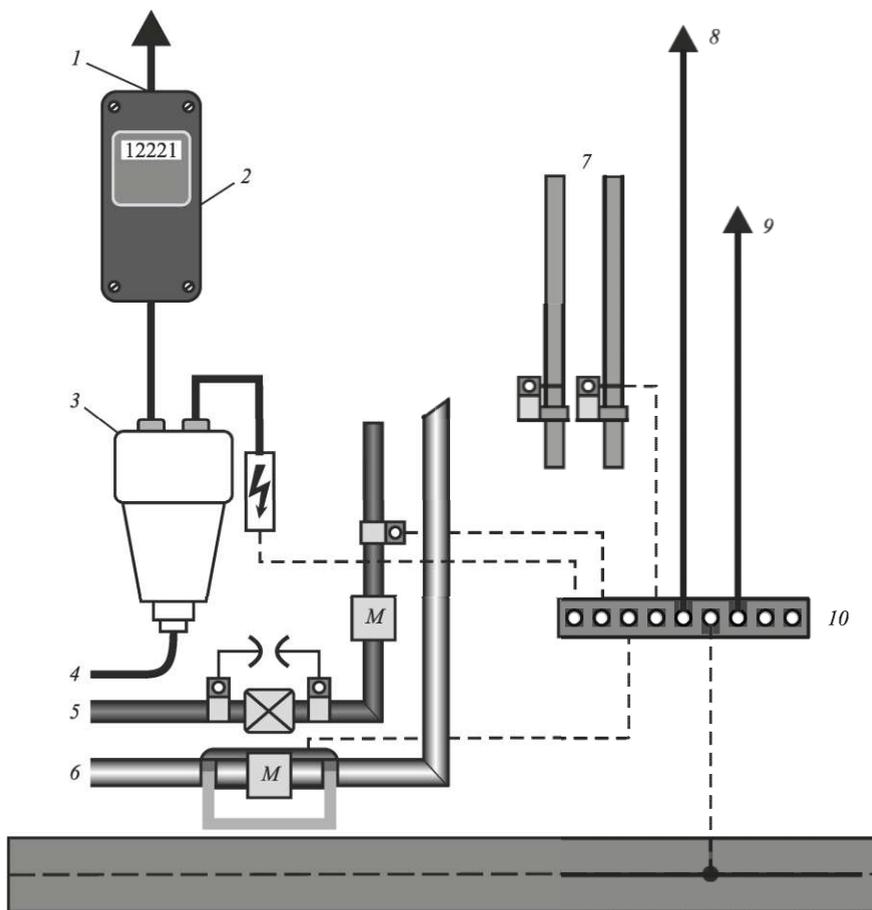
**Рис. 6.48. Способы присоединения корпусов электрического и электронного оборудования к системе уравнивания потенциалов:**

*a* – звездообразная конфигурация и конфигурация в виде сетки; *б* – конфигурации в виде сетки с присоединением к системе уравнивания потенциалов в одной точке; ТОП – общая точка присоединений;  $S, S_s$  – звездообразные конфигурации;  $M, M_m$  – конфигурации в виде сетки;  $M_s$  – конфигурация в виде сетки, объединенная с одной точкой присоединения к системе уравнивания потенциалов



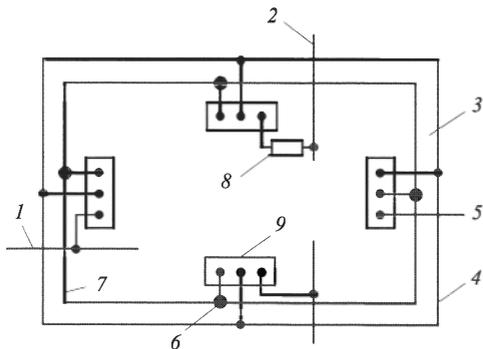
— Шины уравнивания потенциалов  
— Соединительные проводники

□ Оборудование  
● Точки присоединения



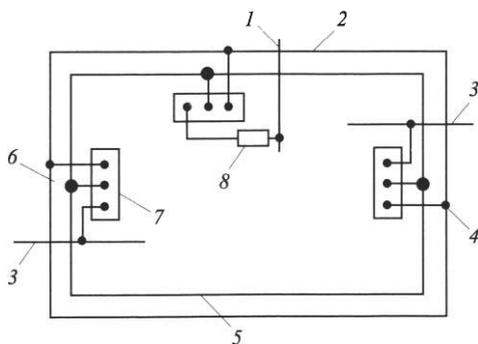
**Рис. 6.49. Присоединения к шине уравнивания потенциалов в здании:**

1 – присоединение потребителя; 2 – счетчик потребления энергии; 3 – щиток здания; 4 – силовой кабель; 5 – газовая труба; 6 – труба водопровода; 7 – труба центрального отопления; 8 – присоединение электронного оборудования; 9 – присоединение оболочки кабеля антенны; 10 – шина уравнивания потенциалов (PE); M – расходомеры



**Рис. 6.51. Присоединения к внутренней кольцевой шине уравнивания потенциалов большого числа входящих электрических и металлических коммуникаций:**

1 – арматура железобетона внешних стен и фундамента; 2 – к дополнительному заземлителю; 3 – точки присоединений; 4 – внутренняя кольцевая шина; 5 – к внешним металлическим коммуникациям, например, водопроводу; 6 – кольцевая шина заземлителя; 7 – защитное устройство; 8 – щитки системы уравнивания потенциалов; 9 – линии связи или электроснабжения; 10 – к дополнительному заземляющему электроду



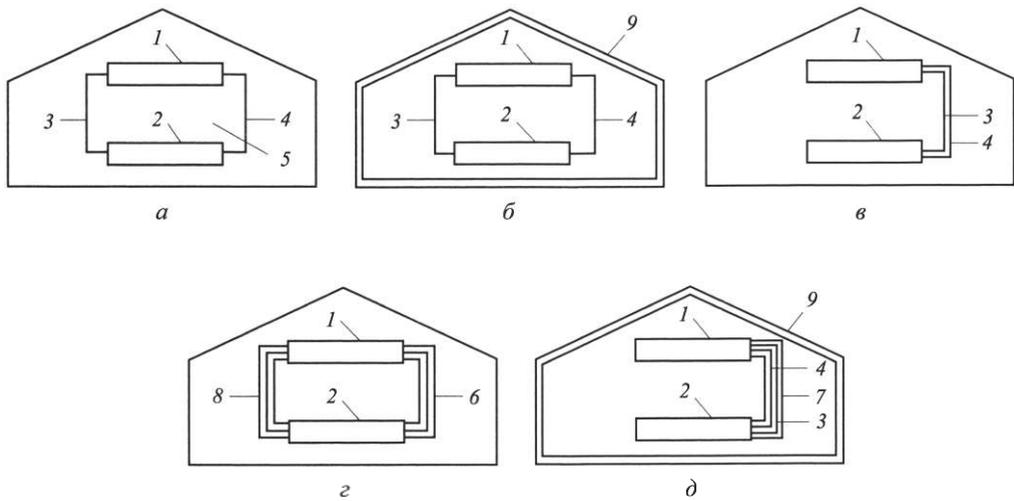
**Рис. 6.52. Соединения с шиной уравнивания потенциалов в помещении на этаже с большим числом проводящих коммуникаций:**

1 – кабель электроснабжения или связи; 2 – внешняя кольцевая горизонтальная шина (выше уровня земли); 3 – внешние подводящие коммуникации; 4 – присоединение к спуску; 5 – арматура железобетонных стен; 6 – специальные точки присоединения к арматуре; 7 – щитки шины уравнивания потенциалов; 8 – защитное устройство

Важным вопросом при обеспечении электромагнитной совместимости является снижение наводок в петлях соединительных проводников между приборами. Некоторые способы уменьшения наводок показаны на рис. 6.53.

В любых случаях следует использовать металлические предметы, конструкции в качестве экрана (рис. 6.54, 6.55). Иногда в качестве экрана следует использовать дополнительные металлические пластины (рис. 6.56), а соединительные кабели прокладывать в непосредственной близости к пластине. Благодаря малой площади петли индуктированное напряжение в ней невелико.

Сигнальные линии при их размещении на пластине должны быть удалены от линий электроснабжения (рис. 6.57).

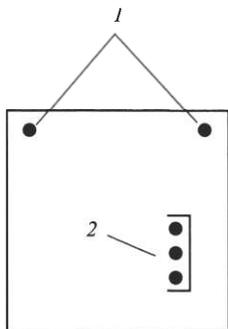
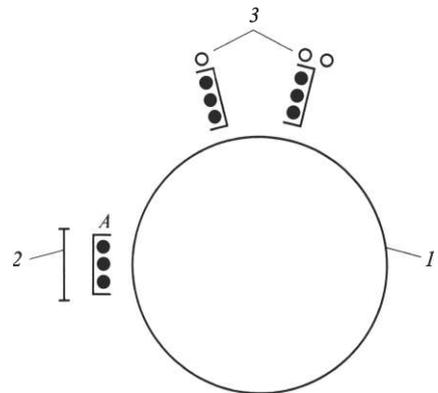


**Рис. 6.53. Методы снижения наводок с помощью экранирования и прокладки проводящих элементов:**

*a* – незащищенная система; *б* – использование внешнего экрана, например, сетки молниезащитной системы, арматуры железобетонных стен, металлического фасада и т.д.; *в* – уменьшение индукционной петли; *г* – экранирование соединительных проводов; *д* – прокладка линий в металлических трубах, лотках; 1, 2 – устройства с металлическими корпусами; 3 – линия электроснабжения; 4 – линия передачи данных; 5 – индукционная петля; 6 – экран линии передачи данных; 7 – металлическая труба; 8 – экран линии электроснабжения; 9 – внешняя система молниезащиты

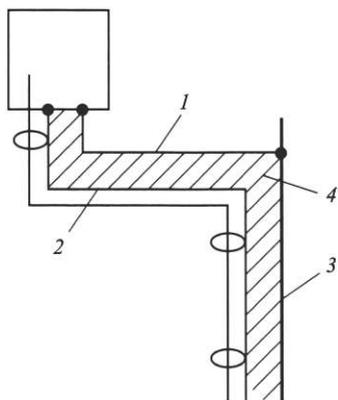
**Рис. 6.54. Использование трубопроводов и лестницы в качестве естественного экрана:**

1 – резервуар; 2 – вспомогательная лестница;  
3 – трубопроводы



**Рис. 6.55. Рациональное размещение линий в мачте (поперечное сечение):**

1 – рациональное размещение кабелей в углах балок;  
2 – вариант размещения кабелей в лотке внутри мачты

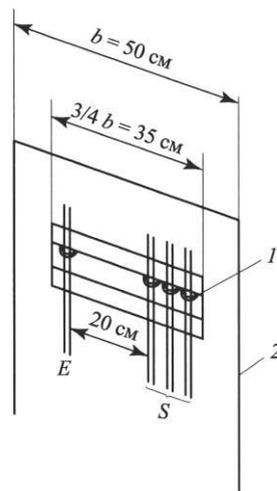


**Рис. 6.56. Уменьшение площади петли при размещении кабелей на поверхности металлической пластины:**

1 – PE-шина (только при эксплуатации оборудования класса I); 2 – дополнительный экран кабеля, заземленный с обоих концов; 3 – металлическая пластина, используемая в качестве дополнительного экрана; 4 – петля с уменьшенной площадью

**Рис. 6.57. Использование металлической пластины в качестве дополнительного экрана:**

1 – крепление кабеля с соединением экрана кабеля к металлической пластине или без соединения;  
2 – края пластины; E – линии электропитания;  
S – сигнальные линии



### Вопросы для самопроверки

1. Какие технические мероприятия по обеспечению электромагнитной обстановки предусматриваются на объектах электроэнергетики?
2. Перечислите нормативные материалы по обеспечению электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики.
3. Изложите принципы защиты линий электропередачи и подстанций от прямых ударов молнии.
4. Как выполняются заземлители объектов энергетики?
5. Какие защитные устройства применяют во вторичных цепях электроэнергетики?
6. В каких местах устанавливают защитные устройства?
7. Как выполняются электрические коммуникации в цепях измерения напряжения и тока?
8. Каково остающееся напряжение варисторов при импульсных воздействиях?
9. Как выполняются соединения металлических элементов заземлителей?
10. Как можно использовать металлические элементы зданий и сооружений для молниезащиты?
11. Как обеспечивается электромагнитная совместимость внутри зон?
12. Изложите принципы координации параметров элементов комбинированных защитных устройств.

---

---

# ПОМЕХИ В КАБЕЛЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

---

---

### 7.1. Методические основы расчета электромагнитного воздействия

Расчеты электромагнитного влияния, базируются на работах Э.Ф. Вэнса для неэкранированных и экранированных кабелей любой протяженности с различными условиями прокладки (над землей, в земле) в группах разной проводимости при воздействии на кабели рассредоточенных в пространстве импульсных источников электромагнитных импульсов.

Кабельные линии (КЛ) играют важную роль во всех системах, управляемых электронными установками; они используются для передачи команд и информации о состоянии различных узлов и для управления ими.

Кабельные линии необходимо учитывать при оценке взаимодействия внешних источников помех, в частности с автоматическими и автоматизированными системами технологического управления электротехническими объектами.

В экранированных КЛ, как правило, большая часть наводимого тока протекает по экрану, а не по несущим информацию жилам, защищенным экраном. Однако даже в этом случае ток, наведенный в жилах, может достигать такого значения, что с ним приходится считаться. Кроме того, эффективность экранов гибких КЛ, используемых для соединений узлов оборудования или подсистем, обычно снижается с ростом частоты. Следовательно, возникает необходимость оценить воздействие тока, наводимого в экранированных КЛ.

Для оценки изменений параметров системы, происходящих в результате воздействия электромагнитного поля на жилы кабелей, сначала надо рассмотреть вопросы, связанные с защищенностью кабеля. Это влечет за собой определение физических и электрических свойств окружающей среды, например почвы, а также расчет параметров электрического поля вдоль оси кабеля. На основании данных о поле и характеристиках кабеля можно определить суммарный ток в последнем. Если кабель экранирован, требуется дополнительный расчет: определение напряжения и тока в проводниках, заключенных в экран.

Практически во всех случаях на характеристики падающей электромагнитной волны оказывают влияние конструкции, расположенные по соседству с кабелем. Поле вблизи силовых и подземных кабелей связи изменяется, например, за счет наличия земли, в результате чего поле, воздействующее на кабель, не является полем падающей волны, а представляет собой результирующее поле. Для наземной КЛ результирующее

поле – это наложение полей падающей и отраженной от поверхности земли волны. Результирующее поле подземной КЛ является той частью падающего поля, которое проникло в землю, т.е. частью, оставшейся после отражения на границе воздух–земля. Для кабелей, проложенных на большой глубине, может происходить дополнительное ослабление поля при распространении в земле.

Если кабели проложены в зданиях и других замкнутых конструкциях, воздействующее поле является частью падающей волны, которое может либо проникать через разрывы, например, двери, окна, швы, трещины и другое, либо распространяться по проводам, которые подвержены внешнему влиянию, диффундировать или проникать через стены, обшивки и т.д. Кабели, проложенные в незранированных конструкциях, например, зданиях с деревянным остовом, могут подвергаться воздействию полей, распространяющихся через стены.

При оценке влияния на кабели важным является определение поля, воздействующего на него. Расположение подверженных влиянию установок внутри зданий обычно весьма сложно и существенно зависит от типа устройства и конструкции, что не позволяет дать общую оценку полей внутри таких замкнутых конструкций. Однако для кабелей, находящихся вне помещений, т.е. для КЛ связи, в изменении поля падающей волны участвуют только воздух и почва (или другая плоская поверхность). Кроме того, часто основные внутренние поля в наземных сооружениях создаются током и напряжением, наводимым в длинных внешних кабелях. Поэтому поля вблизи земли можно рассчитать.

При рассмотрении влияния электромагнитного поля, КЛ может быть представлена подходящей схемой замещения. Подвесные кабели заменяют линией передачи, в которой сами кабели являются одним проводом, а земля – другим. Подземный изолированный кабель и почва, окружающая наружную изолирующую оболочку, образуют линию передачи, и по мере приближения толщины изоляции к нулю, кабель также можно рассматривать как линию передачи.

Важными параметрами при оценке тока, наводимого в кабеле, являются напряженность электрического поля вдоль оси кабеля, т.е. электрического поля, которое бы имело место в отсутствие кабеля, а также волновое сопротивление кабеля и характеристики распространения поля, например затухание и скорость распространения.

Подземные кабели обычно имеют довольно низкое волновое сопротивление (единицы или десятки ом), поскольку жилы находятся очень близко к пути возврата тока (к почве). По этой же причине, а также вследствие того, что почва не является очень хорошим проводником, затухание тока, распространяющегося вдоль подземного кабеля, достаточно велико, и это приводит к тому, что наводимый ток в любой точке вдоль кабеля определяется, в основном, окружающими условиями в непосредственной близости от этой точки.

Анализ влияния электромагнитного поля на подземные кабели показывает, что ток, наводимый в длинном подземном кабеле, приблизительно пропорционален произведению плотности тока в почве на площадь круга, радиус которого равен эквивалентной глубине проникновения  $\delta$  тока в почву, определяемой поверхностным эффектом. Следовательно, кабель имеет тенденцию захватывать часть (обычно около 1/10) тока, который протекал бы в почве в цилиндре радиусом  $\delta$ . Чем больше проводимость почвы, тем меньше ток, наводимый в подземном кабеле.

Подвесные кабели (например, силовые, подвешенные на опорах) имеют более высокие волновые сопротивления (несколько сотен ом). Кроме того, затухание тока,

распространяющегося в подвесном кабеле, значительно меньше. Следовательно, наведенные токи могут распространяться на большие расстояния, а ток в какой-либо точке подвесного кабеля может содержать составляющие токов, наведенных на большом удалении от этой точки.

Если кабели находятся над очень хорошо проводящей (допустим, металлической) поверхностью, максимальный (пиковый) ток, наводимый в кабеле, приблизительно равен  $2E_0 h/Z_b$ , где  $E_0$  – пиковая напряженность поля падающей волны;  $h$  – высота кабеля над поверхностью земли;  $Z_b$  – волновое сопротивление кабеля.

Экранированные кабели широко используют в слаботочных цепях. Часть суммарного тока, наводимого в экранированных кабелях, попадает в окруженные экраном жилы, а остальной ток сосредоточивается в металлической оболочке. Назначение экрана обеспечивать протекание большей части суммарного тока помех по нему с тем, чтобы как можно меньший ток и меньшее напряжение наводились на жилах внутри экрана. Однако распределение тока между экраном и жилами меняется с частотой и зависит от типа экрана.

Напряжение, наводимое на жилах экранированного многожильного кабеля током в экране, в основном синфазное. Это означает, что все жилы внутри кабеля подвергаются одинаковому воздействию тока. Если бы все цепи, образуемые в кабеле, были симметричными, а к двухпроводным цепям подключались симметричные нагрузки в оборудовании с неограниченным подавлением синфазных составляющих, напряжение, наводимое на жилах, не играло бы существенной роли. Однако многие высокочастотные цепи, в которых используются коаксиальные кабели, несимметричны. Кроме того, входные сопротивления оконечного оборудования не обязательно симметричны, а подавление синфазных составляющих обычно составляет 80 дБ или менее даже в схемах, тщательно рассчитанных на их максимальное подавление. Следовательно, синфазное напряжение, наводимое на жилах, частично переходит в двухпроводные цепи за счет асимметрии жил кабеля и нагрузок, а также неполного подавления синфазных составляющих в балансных усилителях и изолирующих трансформаторах.

Анализ электромагнитных связей в многожильных кабелях очень сложен, поскольку все жилы в пучке кабеля электромагнитно связаны через свои взаимные индуктивности и емкости, а токи, возникающие в одной жиле (или паре жил), наводятся во всех других жилах. Расчет напряжений и токов, попадающих в оконечное оборудование, проводится с помощью ЭВМ решением матричных уравнений, которые описывают напряжения и токи в каждой жиле многожильного кабеля.

## 7.2. Взаимодействие электромагнитной волны с почвой

**Электрические свойства почвы и параметры распространения ЭМВ.** Удельные проводимости и относительные диэлектрические проницаемости типичных видов почв и поверхностных вод приведены в табл. 7.1. Удельная проводимость почв данного вида может меняться в пределах одного порядка из-за различия содержания элементов (в основном растворимых солей), а относительная диэлектрическая проницаемость может меняться в 2 раза из-за различия содержания элементов и воды.

Распространение ЭМВ подчиняется волновому уравнению. Для временной зависимости  $e^{j\omega t}$  волновое уравнение имеет вид

$$\nabla^2 E = \gamma^2 E, \quad (7.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения, равный

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}, \quad (7.2)$$

$\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $\mu$ ,  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – магнитная проницаемость, удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость среды соответственно;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – частота).

Предполагается, что  $\mu = \mu_r \mu_0$  и  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, а  $\mu_r$  и  $\varepsilon_r$  являются скалярными величинами.

Таблица 7.1

**Диэлектрическая проницаемость  
и удельная проводимость почвы и воды**

Характер местности	Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ , Ф/м	Удельная проводимость $\sigma$ , см/м
Сухая песчаная прибрежная местность	10	$2 \cdot 10^{-3}$
Болотистая, лесистая равнина	12	$8 \cdot 10^{-3}$
Плодородная культивированная земля	15	$1 \cdot 10^{-2}$
Сельская всхолмленная местность	13	$5 \cdot 10^{-3}$
Каменистая долина с крутыми холмами	10	$2 \cdot 10^{-3}$
Гористая местность	5	$1 \cdot 10^{-3}$
Пресная вода	80	$5 \cdot 10^{-3}$
Морская вода	80	4

Для неферромагнитной среды (т.е.  $\mu_r = 1$  и  $\mu = \mu_0$ ) коэффициент распространения

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon} \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad (7.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\beta$  – коэффициент фазы.

Величина  $\sigma/(\omega\varepsilon)$  называется тангенсом угла диэлектрических потерь. Коэффициент распространения определяет затухание волны и скорость распространения.

Общее решение уравнения (7.1) для монохроматической волны, распространяющейся в направлении  $z$ , имеет вид

$$E(\omega) = E_0 e^{-\gamma z} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}; \quad (7.4)$$

$$H(\omega) = \frac{E_0}{\mu} e^{-\gamma z}. \quad (7.5)$$

На низких частотах, при которых выполняется условие  $\sigma/j(\omega\varepsilon) \gg 1$ , ток проводимости  $\sigma E$  в почве преобладает над током смещения  $j\omega\varepsilon E$ , в то время как на высоких частотах, где выполняется условие  $\sigma/(\omega\varepsilon) \ll 1$ , справедливо обратное. Поэтому приближенные формулы для параметров распространения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и волнового сопротивления  $\eta$  могут быть получены в высокочастотной и низкочастотной частях спектра. Точная формула и формулы при низкочастотном и высокочастотном приближении приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

## Формулы для определения параметров распространения электромагнитной волны

Параметр	Точная формула (общий случай)	Низкочастотное приближение $\sigma \gg \omega \varepsilon$	Высокочастотное приближение $\omega \varepsilon \gg \sigma$	Свободное пространство $\sigma = 0, \mu = \mu_0, \varepsilon = \varepsilon_0$
Коэффициент затухания $\alpha, \text{ м}^{-1}$	$\omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}} - 1 \right)}$	$\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} = \frac{1}{\delta}$	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_r}}$	0
Коэффициент фазы $\beta, \text{ м}^{-1}$	$\omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}} + 1 \right)}$	$\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} = \frac{1}{\delta}$	$\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon}$	$\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon}$
Скорость распространения $v, \text{ м/с}$	$\omega / \beta$	$\omega \delta$	$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$	$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \cdot 10^8$
Волновое сопротивление $\eta, \text{ Ом}$	$\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} \right)}}$	$\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}} = \frac{1+j}{\sigma} \frac{1}{\sigma\delta}$	$\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} = \eta_0 \sqrt{\varepsilon_r}$	$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$

Примечание. Эквивалентная глубина проникновения  $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$ .

**Отражение ЭМВ и их распространение по поверхности.** Часть падающей ЭМВ отражается от поверхности земли обратно в атмосферу, а часть проходит в почву. Проводники над поверхностью подвергаются воздействию суммарного электрического поля (падающего и отраженного), а подземные – воздействию волн, прошедших в почву. Для расчета напряженностей полей, действующих на проводники над поверхностью и подземные, следует определить напряженности полей падающей, отраженной и прошедшей волн вблизи границы воздух–земля.

Система координат, используемая при определении составляющих поля, и направление распространения падающей волны показаны на рис. 7.1. Ось  $z$  находится на границе воздух–земля и проходит параллельно проводнику, а азимутальный угол падения  $\varphi$  измеряется от отрицательной полуоси  $z$ , в то время как угол падения  $\psi$  – от поверхности земли (т.е. от плоскости  $yz$ ). Горизонтальная поляризация означает, что вектор напряженности электрического поля падающей волны параллелен поверхности (плоскости  $yz$ ), а вертикальная поляризация – что вектор напряженности электрического поля падающей волны лежит в плоскости, которая перпендикулярна поверхности земли, и содержит вектор направления распространения. Другими словами, вертикальная поляризация означает, что вектор напряженности магнитного поля параллелен поверхности.

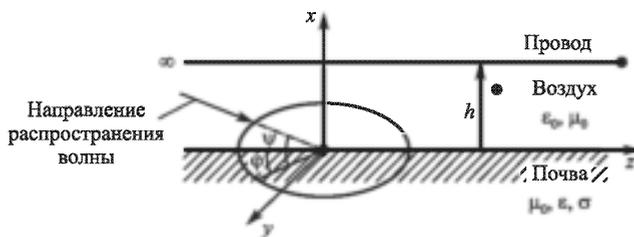


Рис. 7.1. Система координат: азимутальный угол и угол падения волны

**Электрические поля над землей и под поверхностью земли.** Суммарные горизонтальная (по оси  $z$ ) и вертикальная (по оси  $x$ ) составляющие электрического поля над землей наводят ток соответственно в горизонтальных и вертикальных проводниках, расположенных над землей. Эти составляющие на высоте  $h$  при *вертикальной поляризации поля* (если опустить множитель временной зависимости  $e^{j\omega t}$ ) определяются следующими выражениями:

$$E_x(h, z) = E_{\text{в}} e^{-jkz \cos \psi \cos \varphi} (1 + R_{\text{в}} e^{-jk 2h \sin \psi}) \cos \psi; \quad (7.6)$$

$$E_{z\text{в}}(h, z) = E_{\text{в}} e^{-jkz \cos \psi \cos \varphi} (1 - R_{\text{в}} e^{-jk 2h \sin \psi}) \sin \psi \cos \varphi, \quad (7.7)$$

где коэффициент отражения

$$R_{\text{в}} = \frac{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right) \sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right) - \cos^2 \psi\right]^{1/2}}{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right) \sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right) - \cos^2 \psi\right]^{1/2}}, \quad (7.8)$$

а напряженность описывается выражением  $E_{\text{в}} e^{-jkz \cos \psi \cos \varphi + jk(x-h) \sin \psi}$ ,

при горизонтальной поляризации поля на высоте  $h$

$$E_x(h, z) = 0;$$

$$E_{zr}(h, z) = E_{zr} \sin \varphi (1 + R_r e^{-j2kh \sin \psi}) e^{-jkz \cos \varphi \cos \psi}, \quad (7.9)$$

где коэффициент отражения для горизонтально поляризованной волны

$$R_r = \frac{\sin \psi - \left[ \epsilon_r \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\sin \psi + \left[ \epsilon_r \left( 1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}, \quad (7.10)$$

а напряженность поля описывается выражением  $E_{zr} e^{-jkz \cos \varphi \cos \psi + jk(x-h) \sin \psi}$ .

В этих выражениях  $\epsilon_r$  представляет собой относительную диэлектрическую проницаемость земли, а  $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$  – коэффициент фазы (или волновое число) для воздуха. Фаза в этих выражениях дана относительно фазы падающей волны при  $x = h, z = 0$ . Коэффициенты отражений  $R_r$  и  $R_v$  изменяются от 0 до 1. Для идеально проводящей среды ( $\sigma \rightarrow \infty$ )  $R_r = -1$ , а  $R_v = 1$ .

Если выразить поле на высоте  $h$  через напряженность поля на поверхности земли, то получим:

– при вертикальной поляризации

$$\left. \begin{aligned} E_x(h, z) &= \frac{1 + R_v e^{-jk2h \sin \psi}}{1 + R_v} E_x(0, z) \\ E_{zv}(h, z) &= \frac{1 - R_v e^{-jk2h \sin \psi}}{1 - R_v} E_{zv}(0, z) \end{aligned} \right\}, \quad (7.11)$$

– при горизонтальной поляризации

$$E_{zr}(h, z) = \frac{1 + R_r e^{-jk2h \sin \psi}}{1 + R_r} E_{zr}(0, z). \quad (7.12)$$

Часть падающей волны проходит в почву и распространяется по закону  $e^{-\gamma l}$ , где  $l$  – расстояние, измеряемое вдоль направления отраженной (прошедшей) волны.

Направление распространения определяется по выражению

$$\cos \psi_t = jk \cos \psi / \gamma, \quad (7.13)$$

где  $\psi$  – угол падения волны;  $\psi_t$  – угол падения прошедшей в почву волны.

При высоких частотах или плохо проводящей почве

$$\gamma \approx jk \sqrt{\epsilon_r}. \quad (7.14)$$

Более общими при исследовании подземных проводов, например, кабелей с трубчатыми экранами или проводов в стальных трубах, являются случаи низких частот или высокой проводимости, при которых  $|\gamma| \gg k$  и

$$\cos \psi_t \approx 0 \quad (\sigma \gg \omega\epsilon), \quad (7.15)$$

или  $\psi \approx 90^\circ$ , когда прошедшая в почву волна распространяется вертикально вниз (в отрицательном направлении по оси  $x$ ) и

$$1 - R_B \approx \frac{2}{\sin \psi} \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma}}; \quad (7.16)$$

$$1 + R_B \approx 2 \sin \psi \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma}}. \quad (7.17)$$

Коэффициент распространения  $\gamma \approx (1 + j)/\delta$ . Если на поверхность падает волна  $E_{\text{в}}$  или  $E_{\text{г}}$ , то напряженность поля ниже поверхности:

– при вертикальной поляризации

$$E_{\text{зв}}(d) \approx 2E_{\text{в}} \cos \varphi \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma}} e^{-(1+j)d/\delta}, \quad (7.18a)$$

– при горизонтальной поляризации

$$E_{\text{зг}}(d) \approx 2E_{\text{г}} \sin \varphi \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma}} e^{-(1+j)d/\delta}, \quad (7.18б)$$

где фаза поля на глубине  $d$  отсчитывается относительно фазы падающего поля на поверхности по перпендикуляру ( $x = 0$ ).

Из формул (7.18a) и (7.18б) видно, что напряженность поля в почве обратно пропорциональна корню квадратному из удельной проводимости земли и уменьшается экспоненциально с увеличением глубины.

Еще одно приближение можно сделать, если глубина прокладки кабеля  $d$  невелика по сравнению с эквивалентной глубиной проникновения поля в землю. Тогда  $e^{-d/\delta} = 1$  и степенный член в формулах (7.18a) и (7.18б) можно быть заменить на единицу. Поскольку эквивалентная глубина проникновения поля в землю обычно составляет как минимум несколько метров, а глубина прокладки кабелей обычно равна приблизительно 1 м, зависимость поля от глубины зачастую можно пренебречь.

### 7.3. Подвесные кабели

Рассмотрим провод, расположенный параллельно поверхности проводящей среды, например земли. Провод представляет собой линию передачи с распределенным источником поля  $E_z(h, z)$ . Результирующая напряженность поля  $E_z(h, z)$  и реакция провода на него содержат две составляющие: одну – при идеально отражающей поверхности и вторую – поправки на то, что отражение неидеально.

Параметры передачи подвесного проводника определяются путем анализа линии передачи малой площади сечения. Положим, что цилиндр, с электрически малым радиусом  $a$  ( $ka \ll 1$ ) подвешен на электрически малой высоте  $h$  ( $kh \ll 1$ ) над поверхностью земли. Обычно подвесные кабели связи располагают на высоте 5 м или более над землей, а их радиусы могут составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Считается, что высота подвеса кабеля является электрически малой.

Ток, наведенный в вертикальных элементах проводника вертикальной составляющей напряженности результирующего поля, может быть большим, хотя вертикальные элементы обычно много короче горизонтальных пролетов.

### 7.3.1. Формулы для расчета линии передачи

**Линии передачи с распределенным источником.** При анализе влияния электромагнитных волн на линии передачи и подобные им конструкции предполагается, что источник возбуждающего напряжения распределен по длине линии передачи. Такая линия имеет приращение напряжения источника при каждом приращении длины линии. Элемент длины  $dz$  такой линии передачи показан на рис. 7.2. Без источника  $E_z$  эта линия идентична классическим линиям передачи, а методы определения полного продольного сопротивления  $Z = R + j\omega L$  и полной продольной проводимости линии  $Y_{np} = G_{np} + j\omega C$  на единицу длины те же, что и для классических линий передачи. Напряженность источника  $E_z$  соответствует напряженности электрического поля.

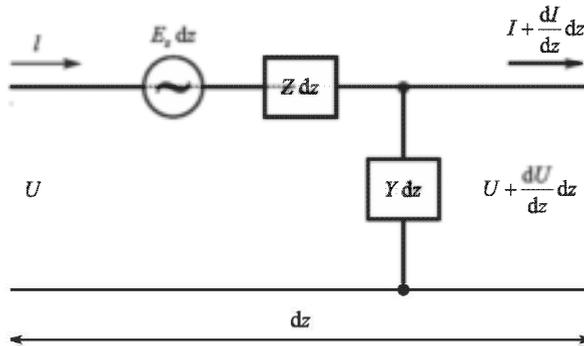


Рис. 7.2. Элемент эквивалентной линии электропередачи

Ток и напряжение вдоль линии передачи (см. рис. 7.2) при гармонически меняющихся сигналах ( $e^{j\omega t}$ ) описываются дифференциальными уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU}{dz} &= E_z - IZ; \\ \frac{dI}{dz} &= -UY. \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

Здесь  $Z$  – полное продольное сопротивление.

Продифференцировав одно уравнение и подставив его в другое, можно получить дифференциальные уравнения второго порядка

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U}{dz^2} - \gamma^2 U &= \frac{dE_z}{dz}; \\ \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I &= -YE_z, \end{aligned} \right\} \quad (7.20)$$

где  $\gamma^2 = -ZY$ ;  $z$  – текущая координата вдоль линии;  $Y$  – полная поперечная проводимость.

За исключением членов, содержащих  $E_z$  уравнения (7.19) и (7.20) идентичны уравнениям для классических линий передачи. Решения уравнений (7.20) таковы:

$$\left. \begin{aligned} I(z) &= [K_1 + P(z)]e^{-\gamma z} + [K_2 + Q(z)]e^{\gamma z}; \\ U(z) &= Z_B \{ [K_1 + P(z)]e^{-\gamma z} - [K_2 + Q(z)]e^{\gamma z} \}, \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P(z) &= \frac{1}{2Z_{B_1}} \int_{z_1}^z e^{\gamma z} E_z dz; \\ Q(z) &= \frac{1}{2Z_{B_2}} \int_{z_2}^z e^{-\gamma z} E_z dz. \end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

Постоянные  $K_1$  и  $K_2$  определяются нагрузочными сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$  при  $z = z_1$  и  $z = z_2$  ( $z_2 > z_1$ ):

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \rho_1 e^{\gamma z_1} \frac{\rho_2 P(z_2) e^{-\gamma z_2} - Q(z_1) e^{\gamma z_2}}{e^{\gamma(z_2-z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2-z_1)}}; \\ K_2 &= \rho_2 e^{-\gamma z_2} \frac{\rho_1 Q(z_1) e^{\gamma z_1} - P(z_2) e^{-\gamma z_1}}{e^{\gamma(z_2-z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2-z_1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

где коэффициенты отражения на концах линии

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_B}{Z_1 + Z_B}; \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_B}{Z_2 + Z_B}. \quad (7.24)$$

Напряженность  $E_z$  в уравнениях (7.22) представляет собой напряженность неискаженного поля, которое существовало бы на высоте подвеса (или глубине прокладки) провода, если бы провод отсутствовал. Это поле описывается уравнениями (7.7) и (7.9) для провода, расположенного над землей, и уравнениями (7.18а) и (7.18б) для провода под землей.

Расчеты, связанные с определением влияния электромагнитного поля, основаны на предположении, что низкочастотное волновое сопротивление воздушной линии может быть использовано в диапазоне частот, где высота линии составляет несколько длин волн. Также предполагается, что можно пренебречь излучением линии и всеми типами волн, кроме типа ТЕМ.

Формулы для линий передачи с распределенным источником будут широко использоваться для следующих типов линий:

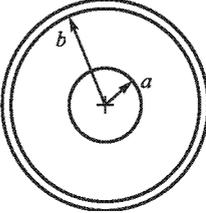
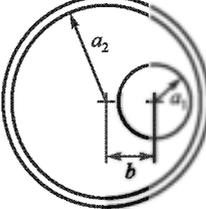
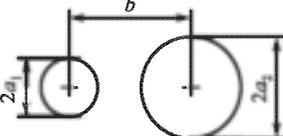
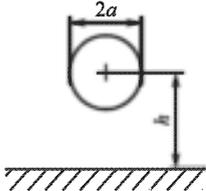
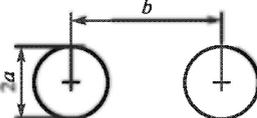
- воздушные линии передачи (электропередачи и связи, где источником является результирующее электрическое поле на высоте линии);
- подземные кабели и трубопроводы, где источником является электрическое поле в почве;
- экранированные кабели, где источником является внутреннее напряжение на единицу длины, наводимое током в экране или металлических покровах кабеля;
- вертикальные элементы, такие как вводные провода и трубопроводы, заземляющие спуски, соединенные с воздушными линиями электропередачи и связи; здесь источником является вертикальное электрическое поле.

Общие решения, данные в уравнениях (7.21)–(7.24), применимы ко всем этим случаям. Поле  $E_z$  (или  $E_x$  для вертикальных элементов) используемое в уравнении (7.22), разное для каждого случая, так что  $P(z)$  и  $Q(z)$  надо выводить для каждого случая отдельно.

Формулы волнового сопротивления двухпроводных линий передачи разнообразных конфигураций приведены в табл. 7.3; приближенные формулы внутренних полных сопротивлений и сопротивления связи на единицу длины цилиндрических проводников с конечной проводимостью даны для случая тонких стенок – в табл. 7.4.

Таблица 7.3

**Волновое сопротивление  
для различных конфигураций линии передачи**

	$Z_B = \frac{\eta}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$
	$Z_B = \frac{\eta}{2\pi} \operatorname{arch} \left[ \frac{a_1^2 + a_2^2 - B^2}{2a_1 a_2} \right]$
	$Z_B = \frac{\eta}{2\pi} \operatorname{arch} \left[ \frac{B^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2} \right]$
	$Z_B = \frac{\eta}{2\pi} \operatorname{arch} \frac{h}{a} \approx \frac{\eta}{2\pi} \ln \frac{2h}{a}, \quad \frac{h}{a} \gg 1$
	$Z_B = \frac{\eta}{2\pi} \operatorname{arch} \frac{b}{2a} \approx \frac{\eta}{\pi} \ln \frac{b}{a}, \quad \frac{b}{a} \gg 1$

Примечание.  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ;  $v = 1/\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ;  $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ;  $C = 1/vZ_c$ ;  $L = Z_c/v$ ;  $\operatorname{arch}(h/a) \approx \ln(2h/a)$  ( $h \gg a$ ).

**Полные сопротивления цилиндрических проводников  
с конечной проводимостью**

Сечение	Сопротивление	Приближенные формулы
	Внутреннее для внешнего пути возврата	$Z_{\text{вн0}} \approx \frac{1}{2\pi b \sigma T} \gamma T \operatorname{cth} \gamma T, T \ll a;$ $Z_{\text{вн0}} \approx R_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{ab} \sigma T}, a \gg T \ll \delta;$ $Z_{\text{вн0}} \approx \frac{1+j}{2\pi a \sigma \delta}, \delta \ll T$
	Внутреннее для внутреннего пути возврата	$Z_{\text{вн}} \approx \frac{1}{2\pi a \sigma T} \gamma T \operatorname{cth} \gamma T, T \ll a;$ $Z_{\text{вн}} \approx R_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{ab} \sigma T}, a \gg T \ll \delta;$ $Z_{\text{вн}} \approx \frac{1+j}{2\pi a \sigma \delta}, \delta \ll T$
	Связи	$Z_{\text{св}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{ab} \sigma T} \frac{\gamma T}{\operatorname{sh} \gamma T}, T \ll a;$ $Z_{\text{св}} \approx R_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{ab} \sigma T}, a \gg T \ll \delta;$ $Z_{\text{св}} \approx \frac{1+j}{\pi \sqrt{ab} \sigma \delta} e^{-(1+j)T/\delta}, \delta \ll T \ll a$
	Внутреннее для внутреннего пути возврата	$Z_{\text{вн}} \approx \frac{\omega \mu}{8} + j\omega \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{2}\delta}{\gamma_0 a}, \delta \gg a, \gamma_0 = 1,781;$ $Z_{\text{вн}} \approx \frac{1+j}{2\pi a \sigma \delta}, \delta \ll a$
	Внутреннее для внешнего пути возврата	$Z_{\text{вн}} \approx \frac{1}{\pi a^2 \sigma}, \delta \gg a;$ $Z_{\text{вн}} \approx \frac{1+j}{2\pi a \sigma \delta}, \delta \ll a$

Примечание.  $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \approx (1+j)/\delta$  при  $\sigma \gg \omega\epsilon$ ;  $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $\mu$  – магнитная

проницаемость, Гн/м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $\sigma$  – удельная проводимость проводника, См/м;  $f$  – частота, Гц

**Параметры передачи подвесного кабеля.** Кабель, находящийся над поверхностью земли (рис. 7.3), можно рассматривать как двухпроводную линию передачи: кабель (или его экран) является одним проводом, а поверхность земли – вторым. Эта линия передачи описывается волновым сопротивлением  $Z_c$  и коэффициентом распространения  $\gamma$ , определяемыми следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z_c &= \sqrt{\frac{Z}{Y}}; \\ \gamma &= \sqrt{ZY}, \end{aligned} \right\} \quad (7.25)$$

где  $Z$  – полное продольное сопротивление, Ом/м;  $Y$  – полная поперечная проводимость, См/м.

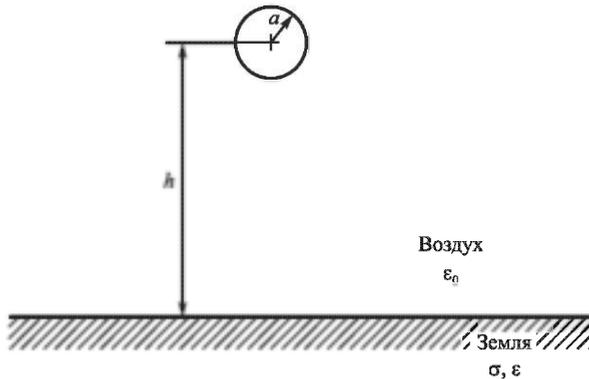


Рис. 7.3. Кабель над поверхностью земли

Полное продольное сопротивление состоит из трех составляющих: индуктивного сопротивления  $\omega L$ , связанного с магнитным полем между кабелем и плоскостью земли, внутреннего сопротивления земли  $Z_3$  и внутреннего полного сопротивления кабеля  $Z_c$ .

Индуктивное сопротивление на единицу длины кабеля радиусом  $a$  на высоте  $h$  над землей

$$j\omega L = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \operatorname{arch} \frac{h}{a} \approx j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{a}, \quad h \gg a. \quad (7.26)$$

Внутреннее сопротивление земли, имеющей конечную проводимость на единицу длины:

$$Z_3 \approx \frac{-j\gamma_k H_0^{(1)}(j\gamma_k 2h)}{4\pi h \sigma H_1^{(1)}(j\gamma_k 2h)} \approx \begin{cases} \frac{1+j}{4\pi h \sigma \delta}, & \delta \ll 2h, \sigma \gg \omega \epsilon \\ \frac{\omega \mu}{8} + j\omega \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{8}{\sqrt{2}\gamma_0 h}, & \delta \gg 2h \end{cases}, \quad (7.27)$$

где

$$\gamma_k = \sqrt{j\omega \mu (\sigma + j\omega \epsilon)}; \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}};$$

$\sigma$  – удельная проводимость земли;  $\gamma_0 = 1,781$ .

Выражение для внутреннего сопротивления цилиндрического отверстия бесконечной протяженности радиусом  $2h$  в проводящей среде приведено в табл. 7.4.

Сравнение внутренних сопротивлений на высоких частотах земли и кабеля круглого сечения показывает, что

$$\frac{Z_e}{Z_i} = \frac{a}{2h} \sqrt{\frac{\sigma_k \mu}{\sigma \mu_k}}, \quad (7.28)$$

где  $\sigma_k$  и  $\mu_k$  – электропроводность и магнитная проницаемость материала кабеля соответственно.

При типичных параметрах земли ( $\sigma = 10^{-2}$  См/м) и кабеля ( $\sigma_k = 5,8 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu_r = 1$ ,  $a = 0,02$  м,  $h = 10$  м)  $Z_e/Z_i = 76$ . Следовательно, для большинства практических случаев, включая линии электропередачи, подвесные кабели связи и другие, находящиеся над землей, можно пренебречь внутренним сопротивлением кабеля. Если кабель находится над металлической поверхностью на высоте, не значительно превышающей его радиус (например, медный кабель вблизи латунной поверхности), внутреннее сопротивление такой поверхности может быть сравнимо с внутренним сопротивлением кабеля.

*Поперечная проводимость* обычно в значительной степени определяется емкостным реактивным сопротивлением между кабелем и поверхностью земли. На кабели, находящиеся довольно близко от поверхности земли (да и то на высоких частотах), влияет проводимость земли. Для большинства же подвесных кабелей можно записать, что поперечная проводимость

$$j\omega C = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\operatorname{arch}\left(\frac{h}{a}\right)} \approx j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{h}{a}\right)}, \quad h \gg a. \quad (7.29)$$

Если емкостная проводимость земли существенна, ее можно оценить по формуле

$$Y_e \approx \gamma/Z_s, \quad (7.30)$$

где  $Z_s$  – внутреннее полное сопротивление на единицу длины, описываемое уравнением (7.27).

*Волновое сопротивление и коэффициент распространения* для кабеля радиусом  $a$ , находящегося на высоте  $h$  над землей, определяются по выражению

$$\left. \begin{aligned} Z_c &\approx \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 + \frac{1}{2 \ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \left[ \ln \frac{1 + \sqrt{j\omega\pi\tau_h}}{\sqrt{j\omega\tau_k}} + \frac{1}{\sqrt{j\omega\tau_a}} \right] \right\}; \\ \gamma &\approx j\omega\sqrt{LC} \left\{ 1 + \frac{1}{2 \ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \left[ \ln \frac{1 + \sqrt{j\omega\pi\tau_h}}{\sqrt{j\omega\tau_k}} + \frac{1}{\sqrt{j\omega\tau_a}} \right] \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (7.31)$$

где  $\sqrt{L/C} = 60 \ln(2h/a)$ ;  $\sqrt{LC} = 1/c$ ;  $\tau = \mu_0 \sigma h^2$ ;  $\tau_a = \mu_k \sigma_k a^2$ ;  $\sigma$  – удельная проводимость земли;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\sigma_k$  – удельная проводимость экрана кабеля;  $\mu_k$  – магнитная проницаемость экрана кабеля;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

### 7.3.2. Напряжение и ток в линии

Переходные характеристики линии передачи представлены для случая экспоненциальных воздействующих импульсов с выбранными постоянными времени спада при наиболее часто встречающихся значениях проводимости земли и при высотах подвеса, типичных для линий высокого напряжения. Во всех случаях предполагается, что экспоненциальное время спада будет значительно больше, чем постоянная времени земли  $\tau_3 = \epsilon_0/\sigma$ .

В представленных результатах предполагается, что земля является хорошим проводником ( $\sigma > \omega\epsilon$ ). Погрешность из-за этого предположения очень мала для почв со средней или выше средней проводимостью и приводит к тому, что напряжения холостого хода получаются немного выше, чем они были бы, если бы полностью были учтены диэлектрические свойства земли на высоких частотах.

**Идеально отражающая поверхность земли.** Напряжение холостого хода, создающееся на конце полубесконечной линии передачи, находящейся на высоте  $h$  над идеально отражающей поверхностью земли, при плоской падающей волне с амплитудой  $E$

$$U_x(\omega) = EcD(\psi, \varphi)(1 - e^{-j\omega t_0})/j\omega,$$

где  $c$  – скорость света;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $t_0 = (2h \sin \psi)/c$ ;  $D(\psi, \varphi)$  – функция направленности.

*При вертикальной поляризации*

$$D(\psi, \varphi) = \frac{\sin \psi \cos \varphi}{\frac{\alpha c}{j\omega} + \frac{\beta}{k} - \cos \psi \cos \varphi}; \quad (7.32)$$

*при горизонтальной поляризации*

$$D(\psi, \varphi) = \frac{\sin \varphi}{\frac{\alpha c}{j\omega} + \frac{\beta}{k} - \cos \psi \cos \varphi}, \quad (7.33)$$

где  $\beta$  – коэффициент фазы для линии передачи;  $k = \omega/c$  – коэффициент фазы для свободного пространства;  $\alpha$  – коэффициент затухания для линии передачи.

**Поправка на конечную проводимость земли.** Суммарное напряжение холостого хода с учетом поправки на конечную проводимость земли есть

$$U_x(\omega) = E_0 c D(\psi, \varphi) \left[ \frac{1 - e^{-j\omega t_0}}{j\omega \left( j\omega + \frac{1}{\tau} \right)} + 2\sqrt{\tau_3} (\sin \psi)^{\pm 1} \frac{e^{-j\omega t_0}}{\sqrt{j\omega \left( j\omega + \frac{1}{\tau} \right)}} \right], \quad (7.34)$$

где  $\tau_3 = \epsilon_0/\sigma$ ;  $\sigma$  – удельная проводимость земли, показатель степени  $+1$  относится к горизонтальной поляризации;  $-1$  – к вертикальной.

Напряжение, определяемое уравнением (7.34), вызывается горизонтальной составляющей электрического поля.

Напряжение холостого хода, наводимое на конце полубесконечной линии экспоненциальным импульсом  $E_0 e^{-t/\tau}$ :

$$U_x(t) = \begin{cases} E_0 c \tau D(\psi, \varphi) [1 - e^{-t/\tau}], & 0 \leq t \leq t_0; \\ E_0 c \tau D(\psi, \varphi) \left[ (e^{-t'/\tau} - 1) e^{-t'/\tau} + 2(\sin \psi)^{\pm 1} \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau}} e^{-\psi/\tau} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{t'}} e^{u^2} du \right], & t \geq t_0, \end{cases} \quad (7.35)$$

где  $t = t' - t_0$ ;  $t_0 = (2h \sin \psi)/c$ .

Первый член в скобках обусловлен размерами (высотой подвеса линии и углом падения) и не зависит от свойств почвы; второй учитывает влияние проводимости земли ( $\tau_e = \epsilon_0/\sigma$ ), а также влияние размеров.

**Кабель, подвешенный на небольшой высоте.** При биэкспоненциальном импульсе

$$E(t) = E_0 (e^{-t/\tau_d} - e^{-t/\tau_r}), \quad (7.36)$$

где  $\tau_r$  и  $\tau_d$  – постоянные времени экспонент ( $\tau_r \ll \tau_d$ ).

Ток и напряжение, наводимые в подвесном кабеле, можно рассчитать, если дважды решить уравнение и оба решения объединить.

Для кабеля, находящегося на поверхности или под ней, падающая и отраженные волны прибывают в одно и то же время, так что в уравнении (7.34)  $t_0 = 0$ , а первый член в уравнении (7.35) исчезает. Кроме того, если кабель находится на земле с плохой проводимостью ( $\alpha + j\beta \gg jk \cos \varphi$ ), то  $D(\psi, \varphi)$  приближается к  $\alpha + j\beta$ . Тогда уравнения для тока КЗ  $I_k = U_x/Z_k$ , полученные с помощью уравнений (7.34) и (7.35), превращаются в уравнения для тока, наводимого в кабеле, проложенном на небольшой глубине.

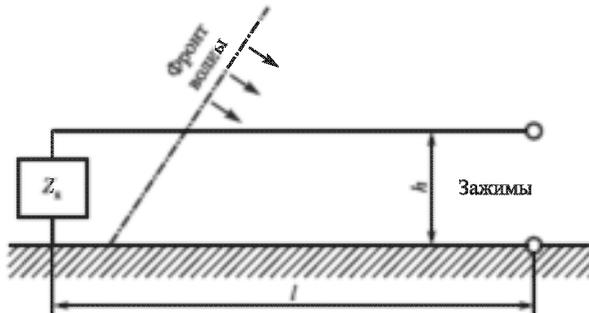


Рис. 7.4. Линия передачи конечной длины

Напряжение холостого хода, наводимое однородно плоской волной на зажимах горизонтальной линии передачи конечной длины  $l$  (рис. 7.4):

$$U_x^l(\omega) = U_x(\omega) \left\{ [1 - e^{-(\gamma - jk')l}] - \rho_k [e^{-\gamma 2l} - e^{-(\gamma - jk')l}] \frac{D(\psi, \varphi + \pi)}{P(\psi, \varphi)} \right\} \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_k e^{-\gamma 2l}]^n, \quad (7.37)$$

где  $U_x(\omega)$  – напряжение, наводимое в полубесконечной линии;

$$\gamma \approx \alpha + j\omega/c; \quad k' = \omega(\cos \psi \cos \varphi)/c; \quad \rho_k = (Z_k - Z_0)/(Z_k + Z_0).$$

## 7.4. Подземные кабели

Принципиальные различия подземных и подвесных кабелей заключаются в осевом электрическом поле и параметрах линий передачи. Электрическое поле, которое взаимодействует с подземным кабелем, – это поле под поверхностью земли на глубине прокладки кабеля. На поверхности оно представляет собой результирующее поле, остающееся поле отражения; в случае идеально проводящей поверхности оно исчезает. В случае идеально проводящей среды всегда существует остаточное поле параллельное поверхности. Поле ниже поверхности – это поверхностное поле, измененное из-за проникновения в почву (или неидеально проводящую среду).

Коэффициент распространения и волновое сопротивление подземного кабеля обычно определяются свойствами земли или, по крайней мере, сильно зависят от них. Поскольку большая часть магнитного поля, влияющего на ток в кабеле, находится в земле, окружающей кабель, проводимость почвы обуславливает появление большого коэффициента затухания и коэффициента фазы, значительно большего, чем коэффициент фазы для свободного пространства  $\omega/c$ . Результатом этого является то, что в подземном проводнике ток имеет тенденцию к более медленному нарастанию, чем в надземном. Кроме того, из-за большого коэффициента затухания ток, наводимый в подземном проводнике, определяется в основном полем и приращениями наводимого тока в непосредственной близости от точки наблюдения.

На рис. 7.5 показано поперечное сечение кабеля, проложенного в земле, коаксиальной линии передачи, образованной кабелем и почвой.

Рис. 7.5. Изолированный подземный кабель

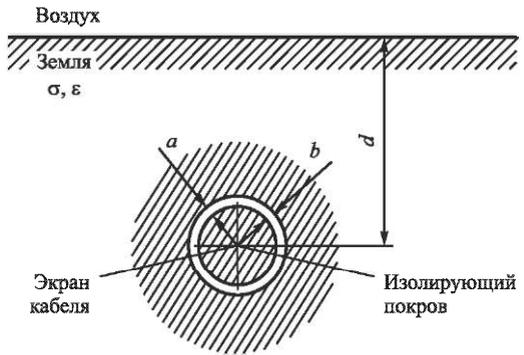
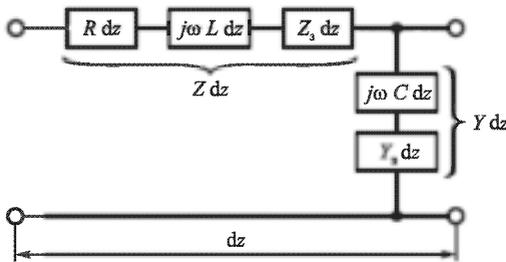


Рис. 7.6. Элемент линии передачи, образованной подземным кабелем и землей

**Полное сопротивление на единицу длины.** Сопротивление  $Z$  состоит из внутренних полных сопротивлений земли  $Z_s$  и кабеля  $Z_k$  и реактивного сопротивления  $j\omega L$  изолирующего зазора (рис. 7.6). Таким образом, полное сопротивление на единицу длины

$$Z = Z_s + Z_k + j\omega L. \quad (7.38)$$

Внутреннее сопротивление земли обычно доминирует. С достаточной точностью задается следующим выражением:

$$Z_s = \frac{-j\gamma}{4\pi b \sigma} \frac{H_0^{(1)}(j\gamma_s b)}{H_1^{(1)}(j\gamma_s b)},$$

или

$$Z_s \approx \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{2\delta}}{\gamma_0 b} = R_s + j\omega L_s, \quad \delta \gg a, \quad (7.39)$$

где  $b$  – внешний радиус изоляции;  $H_0^{(1)}$  и  $H_1^{(1)}$  – функции Ханкеля;  $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$  – эквивалентная глубина проникновения поля в землю;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\gamma_0 = 1,781$ .

Внутреннее сопротивление экрана кабеля

$$Z_{\kappa} \approx \frac{(1+j) \frac{T}{\delta}}{2\pi a \sigma T} \operatorname{cth} \left( (1+j) \frac{T}{\delta} \right), \quad (7.40)$$

где  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения тока в экран;  $\sigma$  – удельная проводимость экрана;  $T$  – толщина экрана.

Реактивная составляющая

$$j\omega L = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right). \quad (7.41)$$

Для встречающихся на практике кабелей и проводимостей земли сопротивление  $Z_3$  значительно больше, чем внутреннее сопротивление кабеля  $Z_{\kappa}$  или реактивное сопротивление  $\omega L$  изолирующего зазора.

Если подземные кабели не имеют изолирующих покровов, в уравнении (7.41)  $b$  заменяется на  $a$ , а  $L = 0$ . Кабели с полупроводящими пластмассовыми оболочками ведут себя, как неизолированные кабели.

Для расчета сопротивления  $Z$  во многих практических случаях можно использовать следующее приближенное выражение:

$$Z \approx \frac{\omega \mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{0,794\delta}{a}. \quad (7.42)$$

**Полная проводимость на единицу длины.** Проводимость  $Y$  на единицу длины состоит из емкостной проводимости  $j\omega C$  изоляции, соединенной последовательно с полной проводимостью  $Y_3$  земли:

$$Y = \frac{j\omega C Y_3}{j\omega C + Y_3}. \quad (7.43)$$

Проводимость изоляции

$$j\omega C = \frac{j\omega 2\pi \varepsilon}{\ln \left( \frac{b}{a} \right)}, \quad (7.44)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость изоляции.

Полная проводимость земли

$$Y_3 \approx \gamma^2 / Z_3, \quad (7.45)$$

где коэффициент распространения поля в земле

$$\gamma = \sqrt{j\omega \mu_0 (\sigma + j\omega \varepsilon)} \approx \frac{1+j}{\delta}, \quad \sigma \gg \omega \varepsilon. \quad (7.46)$$

На низких частотах ( $\omega C \ll |Y_3|$ ) полная проводимость на единицу длины

$$Y \approx j\omega C, \quad f \ll |Y_3| / (2\pi C). \quad (7.47)$$

На высоких частотах ( $\omega C \gg |Y_3|$ )

$$Y \approx Y_3, \quad f \gg |Y_3| / (2\pi C). \quad (7.48)$$

Определим суммарный ток, наводимый в кабеле плоской волной, падающий на поверхность земли (рис. 7.7). Волну представим в виде экспоненциального импульса;

однако постоянная времени спада в определенных пределах произвольна, так что можно получить поле падающей волны, приближающееся к импульсному (очень короткий спад) или к описываемому ступенчатой функцией (очень длинный спад). На ток в кабеле также влияют направление движения волны и проводимость земли. Направление движения волны учитывается функцией направленности  $D(\psi, \varphi)$ , проводимость земли – постоянной времени  $\tau_3 = \epsilon_0/\sigma$ . Таким образом, суммарный ток в кабеле зависит от амплитуды импульса воздействующего поля и от трех параметров:  $\tau$  – постоянной времени спада импульса падающего поля,  $\tau_3$  – постоянной времени земли и  $D(\psi, \varphi)$  – функции направленности. Для длинного подземного кабеля суммарный ток определяется только зависимостью от приведенного времени  $t/\tau$ .

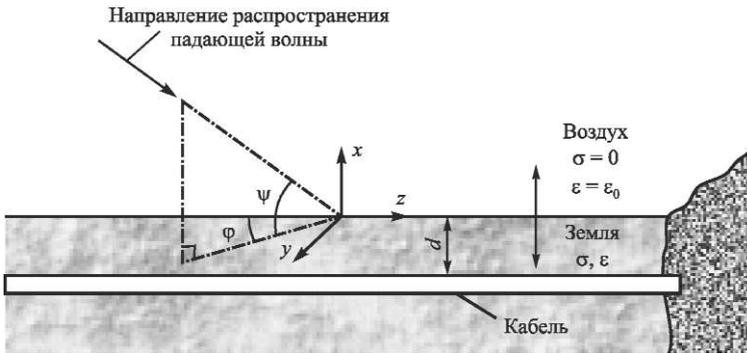


Рис. 7.7. Система координат для кабеля

Результаты оценки суммарного тока даны в предположении, что земля ведет себя как проводник. Для многих практических случаев это ограничение не влечет за собой осложнения, так как земля является диэлектриком с затуханием, только в весьма небольшом диапазоне частот. Кроме того, экран подземных кабелей обычно вносит столь большое затухание на этих частотах, что влиянием электромагнитного поля можно пренебречь при анализе напряжения и тока в жилах кабеля.

Падающий электромагнитный импульс, как указано ранее, имеет экспоненциальную форму  $E_0 e^{-t/\tau}$ . Предполагается также, что направление падения волны на поверхность земли определяется углом падения  $\psi$  и азимутальным углом  $\varphi$  (см. рис. 7.7). Глубина прокладки кабеля невелика по сравнению с глубиной проникновения поля в землю, так что поле на глубине кабеля в основном то же, что и на поверхности.

Приведенные далее выражения для тока относятся к точкам, удаленным от концов бесконечно (электрически) длинных подземных кабелей, неизолированных или имеющих тонкую изоляцию. При анализе предполагается, что  $\sigma \gg \omega \epsilon$  и что радиус кабеля  $a$  мал по сравнению с глубиной проникновения тока в почву. Ток в кабеле

$$I(z, \omega) = P(z)e^{-\gamma z} + Q(z)e^{\gamma z}. \quad (7.49)$$

При глубине прокладки, небольшой по сравнению с глубиной проникновения поля в почву ( $d \ll \delta$ ), и при  $|\gamma| \gg k \cos \psi \cos \varphi$

$$P(z)e^{-\gamma z} \approx Q(z)e^{\gamma z} \approx \frac{E_z(d)}{2Z_c \gamma}. \quad (7.50)$$

Тогда ток в кабеле

$$I(z, \omega) = \frac{E_z(d)}{Z_b \gamma} \approx \frac{E_z(0)}{Z_3} \approx \frac{2D(\psi, \varphi) \sqrt{j\omega \tau_3 E_i(\omega)}}{j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{\sqrt{2\delta}}{\gamma_0 a} \right)}, \quad (7.51)$$

при

$$Z_3 \approx j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{2\sigma}}{\gamma_0} \quad \text{и} \quad E_z(0) \approx 2D(\psi, \varphi) \sqrt{j\omega \tau_3 E_i(\omega)}.$$

**Ток в кабелях на больших глубинах.** Если кабель длиной  $l$  находится на глубине  $d$ , напряженность поля  $E_z(d)$  уменьшается в  $e^{-d/\delta}$  раз. Суммарный ток, наводимый в длинном кабеле падающим экспоненциальным импульсом:

$$I(\omega) \approx I_0 \frac{e^{-\sqrt{j\omega/\tau_3} dl}}{\sqrt{j\omega \tau_3 \left( j\omega + \frac{1}{\tau} \right)}}, \quad (7.52)$$

где  $d$  – глубина прокладки кабеля, м;  $\tau_3$  – время релаксации заряда в изоляции кабеля.

Используя преобразование Фурье, получаем

$$i(t) \approx I_0 e^{-t/\tau} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{pt}} e^{-p/u^2} e^{u^2} dt, \quad (7.53)$$

где  $p = (d/c)^2 (4\tau\tau_3)^{-1}$ .

**Ток вблизи конца электрически длинного неизолированного кабеля.** Если кабель в точке  $z = 0$  не нагружен на свое волновое сопротивление, то вблизи конца полубесконечного кабеля (от  $z = 0$  до  $z = \infty$ ) постоянная  $K_2 = 0$ , а постоянная  $K_1 \neq 0$ .

Если кабель замкнут накоротко ( $Z_1 \ll Z_b$ ), то  $\rho_1 = -1$  и  $K_1 = Q(0)$ . Тогда

$$I(z) \approx [Q(0) + P(z)]e^{-\gamma z} + Q(z)e^{\gamma z}, \quad (7.54)$$

где

$$P(z)e^{-\gamma z} \approx \frac{E_z}{2Z_b \gamma} (1 - e^{-\gamma z}) (|\gamma| \gg k'); \quad (7.55)$$

$$Q(z)e^{\gamma z} \approx E_z / 2Z_b \gamma. \quad (7.56)$$

Поэтому наводимый ток вблизи конца короткозамкнутого кабеля

$$I(z) \approx E_z / Z_b \gamma = E_z / Z_3. \quad (7.57)$$

Это выражение совпадает с выражением (7.51) для тока вдали от концов электрически (бесконечно) длинного кабеля.

Если кабель нагружен на свое волновое сопротивление, то  $K_1 = K_2 = 0$ , а  $P(z)$  и  $Q(z)$  определяются выражениями (7.55) и (7.56).

Тогда ток вблизи конца кабеля

$$I(z) \approx \frac{E_z}{Z_3} - \frac{E_z}{2Z_3} e^{-\gamma z}. \quad (7.58)$$

На конце ( $z = 0$ ) наводимый ток

$$I(0) \approx E_z / 2Z_3. \quad (7.59)$$

Для малоуглубленного неизолированного кабеля

$$\gamma \approx \sqrt{j\omega\mu_0\sigma} \approx \frac{\sqrt{j\omega}}{c\sqrt{\tau_c}},$$

и ток описывается следующим образом:

$$i(z, t) \approx i_\infty(z, t) - I_0 e^{-t/\tau} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^{\sqrt{t/\tau}} [e^{-\rho_1/u^2} + e^{-\rho_2/u^2}] e^{u^2} du, \quad (7.60)$$

где

$$i_\infty(z, t) = I_0 e^{-t/\tau} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{t/\tau}} e^{u^2} du;$$

$$\rho_1 = \frac{1}{4\tau\tau_c} \left( \frac{nl+z}{c} \right)^2; \quad \rho_2 = \frac{1}{4\tau\tau_c} \left[ \frac{(n+1)l-z}{c} \right]^2.$$

## 7.5. Влияние электромагнитного поля, проникающего через экраны кабелей

### 7.5.1. Эквивалентная схема экранированных кабелей

На рис. 7.8 показан элемент линии передачи длиной  $dz$ , который содержит распределенный источник продольного напряжения  $[E_z(dz) = Z_{\text{эк}} I_0(dz)]$ , где  $I_0(dz)$  – ток в экране] и распределенный источник тока утечки  $[J(dz) = -Y_{\text{эк}} U_0(dz)]$  – внешнее напряжение экрана]. Свойства экрана и внешней среды учитываются полным сопротивлением связи  $Z_{\text{эк}}$  и полной проводимостью связи  $Y_{\text{эк}}$ .

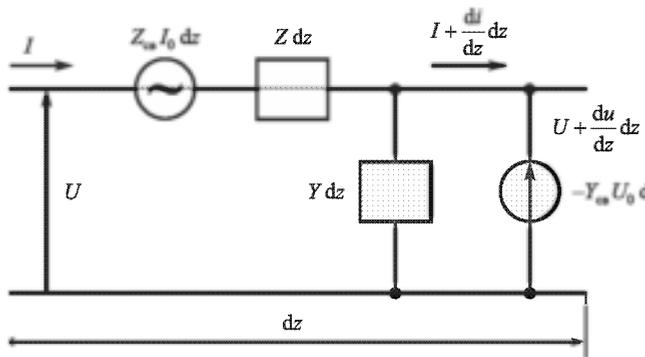


Рис. 7.8. Эквивалентная схема внутренней цепи с учетом полного сопротивления и полной проводимости связи

Дифференциальные уравнения для напряжения внутри кабеля  $U$  и тока  $I$  имеют вид

$$\frac{dU}{dz} + ZI = E_z(z); \quad (7.61)$$

$$\frac{dI}{dz} + YU = J(z), \quad (7.62)$$

где  $Z$  – продольное полное сопротивление на единицу длины;  $Y$  – поперечная проводимость на единицу длины линии передачи, образованной внутренними проводниками и экраном;  $E_2(z)$  – напряжение продольного источника на единицу длины;  $J(z)$  – ток, вызванный поперечным напряжением источника на единицу длины, создаваемый внешним током и напряжением экрана.

Эти дифференциальные уравнения можно решить для каждого источника отдельно, после чего окончательный результат получают суперпозицией. Такой подход позволяет непосредственно использовать выражения (7.21)–(7.24), если  $J(z) = 0$ , и получить аналогичные выражения, если  $E_2(z) = 0$ . Во многих случаях (например, при использовании трубчатых экранов) источником тока  $J(z)$  можно пренебречь, в результате чего адекватными оказываются решения только для источника напряжения  $E_2(z)$ . Случаи, когда источником тока нельзя пренебречь и внутренние ток и напряжение создаются только им, рассматриваются далее.

Если электрически короткий кабель (его длина  $l$  мала по сравнению с длиной волны,  $l \ll \lambda$ ) нагружен на сопротивление  $Z_1$  на одном конце и  $Z_2$  на противоположном, для наведенных тока, протекающего в нагрузках, и напряжения на концах можно записать

$$\left. \begin{aligned} I_1 &\approx I_0 Z_{\text{св}} l \frac{1}{Z_1 + Z_2} + U_0 Y_{\text{св}} l \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}; \\ U_1 &\approx -I_1 Z_1; \end{aligned} \right\} \quad (7.63)$$

$$\left. \begin{aligned} I_2 &\approx I_0 Z_{\text{св}} l \frac{1}{Z_1 + Z_2} + U_0 Y_{\text{св}} l \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}; \\ U_2 &\approx -I_2 Z_2. \end{aligned} \right\} \quad (7.64)$$

Здесь ток экрана  $I_0$  протекает от одного конца к другому, и напряжение экрана  $U_0$  определяется по отношению к земле или проводу, являющемуся возвратным для тока экрана (рис. 7.9).

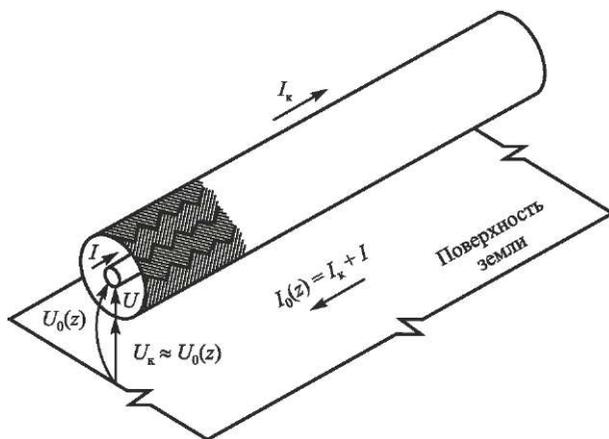


Рис. 7.9. Напряжения и токи в экранированном кабеле

Полное сопротивление связи экрана в наиболее общем виде определяется как

$$Z_{\text{св}} = \frac{1}{I_0} \frac{dU}{dz} \Big|_{l=0}, \quad (7.65)$$

где  $I_0$  – суммарный ток, протекающий в экране;  $dU/dz$  – создаваемое этим током напряжение на единицу длины линии передачи, образованной экраном и жилами внутри экрана.

Сопротивление связи обуславливает напряжение холостого хода, образующееся между внутренними проводниками и экраном, отнесенными к току экрана в кабеле единичной длины (при длинах волн, значительно превышающих 1 м).

Полное сопротивление связи всегда содержит составляющую, связывающую ток экрана с продольным электрическим полем внутри экрана, поскольку материалы, используемые для экранов, всегда имеют конечную проводимость (электрическое поле внутри токнесущего экрана никогда не равно нулю). Кроме того, если экраны с утечкой, например, выполненные в виде намотанной ленты или оплетки, то в выражение полного сопротивления связи будет входить член взаимной индуктивности, учитывающий влияние электромагнитного поля через щели в экране или круговые составляющие токи в нем.

Полная проводимость связи экрана зависит от внешней окружающей среды, а также от свойств экрана. Общая формула проводимости связи имеет вид

$$Y_{cb} = \frac{1}{U_0} \left. \frac{di}{dz} \right|_{U=0}, \quad (7.66)$$

где  $U_0$  – напряжение между внутренними проводниками и землей (внешней средой) (см. рис. 7.9);  $di/dz$  – ток на единицу длины, поступающий во внутренний проводник из внешней среды (земли).

Полная проводимость связи обуславливает ток короткого замыкания, наведенный во внутренних проводниках. Полная проводимость связи металлических трубчатых экранов, не имеющих щелей, пренебрежимо мала, но для экранов с разрывами она содержит член, учитывающий емкостную связь между внутренними проводниками и внешней конструкцией, т.е. проводом, являющимся возвратным для тока экрана.

Можно использовать и другое выражение для распределенного тока  $J(z)$ . Как отмечалось ранее,

$$J(z) = -Y_{cb} U_0 = -j\omega C U_0, \quad (7.67)$$

где  $U_0$  – напряжение между центральным (внутренним) проводником и землей или внешней конструкцией;  $C$  – емкость кабеля на единицу длины.

Полная проводимость связи  $Y_{cb}$ , следовательно, зависит от условий возврата тока экрана, т.е. внешней среды, и от свойств экрана.

### 7.5.2. Трубчатые экраны

**Полное сопротивление связи.** Влияние через металлический тонкостенный трубчатый экран может осуществляться только путем проникновения электромагнитных полей через стенки трубки. Полное сопротивление связи для таких тонкостенных трубчатых экранов имеет вид

$$Z_{cb} = \frac{1}{2\pi a \sigma} \frac{(1+j) \frac{d}{\delta}}{\text{sh}(1+j) \frac{d}{\delta}}, \quad (7.68)$$

где  $a$  – радиус экрана;  $d$  – толщина стенки;  $\sigma$  – удельная проводимость материала экрана;  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения в экран.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu_r$  – магнитная проницаемость экрана.

Предполагается, что толщина стенки  $d$  невелика по сравнению с радиусом трубки  $a$  и что радиус  $a$  мал по сравнению с наименьшей рассматриваемой длиной волны. Также предполагается, что экран выполнен из хорошего проводника (металла), что позволяет пренебречь током смещения в материале экрана ввиду его малости по сравнению с током проводимости.

На низких частотах, для которых выполняется условие  $d/\delta \ll 1$ , полное сопротивление связи

$$|Z_{св}| \approx 1/(2\pi a \sigma d) = R_0, \quad (7.69)$$

где  $R_0$  – сопротивление трубки постоянному току на единицу длины.

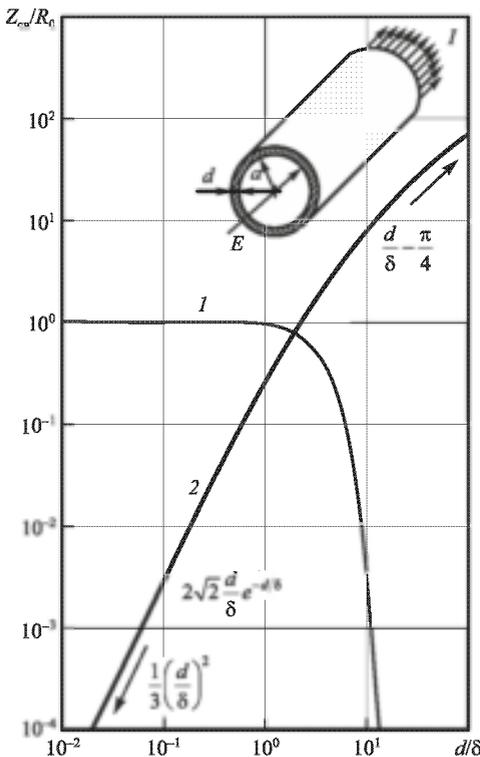
На высоких частотах, для которых выполняется условие  $|d/\delta| \gg 1$ ,  $\text{sh}(+j)d/\delta$  приближается к  $0,5e^{(1+j)d/\delta}$ , а полное сопротивление связи

$$|Z_{св}| = 2\sqrt{2}e^{-d/\delta} R_{hf}, \quad (7.70)$$

где  $R_{hf} = 1/(2\pi a \delta \sigma)$  – сопротивление листа длиной 1 м, шириной  $2\pi a$  и толщиной, равной  $\delta$ , с удельной проводимостью  $\sigma$ .

Фаза полного сопротивления связи на высоких частотах

$$\theta_z = -d/\delta + \pi/4. \quad (7.71)$$

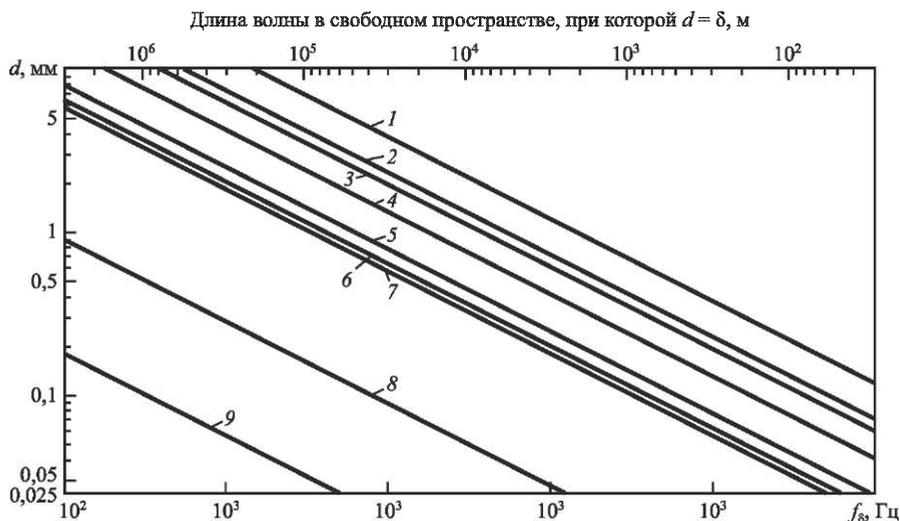


Изменение модуля и фазы полного сопротивления связи (приведенного к низкочастотному сопротивлению  $R_0$ ) для трубчатого экрана показано на рис. 7.10. На этом же рисунке даны их асимптотические приближения.

Как видно из уравнений (7.70) и рис. 7.10, модуль полного сопротивления связи очень быстро уменьшается с увеличением  $d/\delta$  (более единицы), в результате чего во внутреннюю полость экрана проникает очень небольшая часть высокочастотного спектра.

**Рис. 7.10. Отношение сопротивления связи тощкостенных сплошных цилиндрических экранов к сопротивлению экрана постоянному току:**

1 – модуль; 2 – отрицательная фаза, рад



**Рис. 7.11. Частота, при которой толщина  $d$  стенки экрана равна эквивалентной глубине  $\delta$  проникновения:**

1 – насыщенная сталь с высоким  $\mu$ ; 2 – свинец; 3 – насыщенная магнито-мягкая сталь; 4 – латунь; 5 – алюминий; 6 – медь; 7 – серебро; 8 – сталь с  $\mu = 500$ ; 9 – сталь с  $\mu = 50\,000$

Частота, при которой толщина стенки равна глубине проникновения для нескольких видов материала экрана и определенного диапазона толщины стенки  $d$ , показана на рис. 7.11. На рис. 7.12 приведено изменение полного сопротивления связи в зависимости от частоты, а в табл. 7.5 даны значения  $R_0$  и частоты  $f_\delta$ , при которой  $d/\delta = 1$ , для типовых размеров жестких стальных экранов.

Другое выражение для полного сопротивления связи тонкостенных трубчатых экранов, которое используется для обратного преобразования Фурье переходной функции экрана, можно получить, если предположить, что

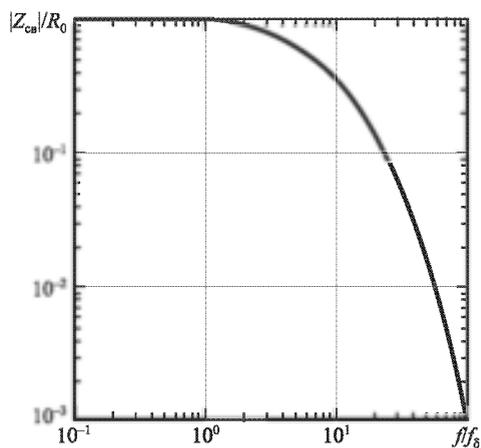
$$(1 + j) \frac{d}{\delta} \sqrt{j\omega\tau}, \quad (7.72)$$

где постоянная времени проникновения через экран

$$\tau = \mu_0 \sigma d^2. \quad (7.73)$$

Тогда полное сопротивление связи экрана

$$Z_{cb} = R_0 \frac{\sqrt{j\omega\tau}}{\text{sh} \sqrt{j\omega\tau}}. \quad (7.74)$$



**Рис. 7.12. Изменение сопротивления связи жесткой стальной трубки**

Параметры  $R_0$  и  $f_3$  для стальных трубок

Диаметр трубки, мм		$R_0$ , Ом/м	$f_3$ Гц	
внешний	внутренний		$\mu_r = 500$	$\mu_r = 1$
21,3	15,8	$1,03 \cdot 10^{-3}$	11,00	5507
26,7	21,4	$7,77 \cdot 10^{-4}$	10,30	5124
33,4	26,6	$5,23 \cdot 10^{-4}$	7,40	3699
42,1	35,0	$3,86 \cdot 10^{-4}$	6,68	3339
48,2	40,9	$3,23 \cdot 10^{-4}$	6,22	3112
60,3	52,5	$2,40 \cdot 10^{-4}$	5,52	2759
73,0	62,7	$1,52 \cdot 10^{-4}$	3,18	1588
88,9	77,9	$1,16 \cdot 10^{-4}$	2,81	1403
101,6	90,1	$9,64 \cdot 10^{-5}$	2,56	1281
114,3	102,3	$8,14 \cdot 10^{-5}$	2,33	1165
141,3	128,2	$6,01 \cdot 10^{-5}$	1,97	983
168,8	154,0	$4,63 \cdot 10^{-5}$	1,67	834

**Напряжения и токи в коротких кабелях.** Для кабеля длиной  $l$ , экран которого имеет сопротивление  $R_0$  постоянному току (на единицу длины) и по которому протекает ток  $I_0 e^{-t/\tau}$ , напряжение холостого хода на конце кабеля, создаваемое между сердечником и экраном:

$$U_x(\omega) = \frac{I_0 R_0 l}{2} \frac{\sqrt{j\omega\tau_3}}{\left(j\omega + \frac{1}{\tau}\right) \text{sh}\sqrt{j\omega\tau_3}}, \quad (7.75)$$

где  $R_0 = (2\pi a c d)^{-1}$  – сопротивление единицы длины экрана постоянному току;  $\tau_3 = \mu \sigma d^2$  – постоянная времени проникновения поля через экран;  $\tau$  – постоянная времени спада экспоненциального импульса тока в экране.

Ток, наводимый в жилах, нагруженных протекающим в экране током  $I_0$  на свои волновые сопротивления  $Z_c$  на обоих концах кабеля:

– при коротком импульсе ( $\tau \ll \tau_3$ )

$$i(t) = \frac{I_0 R_0 l}{2Z_c} \left(\frac{\tau}{\tau_3}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\tau_3}{t}\right)^{3/2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(2n-1)^2 \tau_3}{2t} - 1 \right] e^{-(2n-1)^2 \tau_3 / 4t}, \quad (7.76)$$

– при длинном импульсе ( $\tau \gg \tau_3$ )

$$i(t) = \frac{I_0 R_0 l}{2Z_c} \left(\frac{\tau}{\tau_3}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\tau_3}{t}\right)^{1/2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(2n-1)^2 \tau_3 / 4t}. \quad (7.77)$$

Напряжение на конце короткого кабеля  $U(t) = i(t)Z_c$ , если оба конца кабеля разомкнуты.

Пиковые напряжения между сердечником и экраном, когда все жилы разомкнуты на обоих концах:

$$U_{\max}(t) = \begin{cases} \frac{I_0 R_0 l}{2}, & \tau \gg \tau_s; \\ 5,9 \frac{\tau}{\tau_s} \frac{I_0 R_0 l}{2}, & \tau \ll \tau_s; \\ 0,77 \frac{\tau}{\tau_s} \frac{I_0 R_0 l}{2}, & \tau = \tau_s. \end{cases} \quad (7.78)$$

### 7.5.3. Оплеточные экраны

Оплетка является наиболее широко используемым в области электроники типом экрана. Вид плетения такого экрана характеризуют число жгутов, образующих экран, проволок в каждом жгуте и пересечений жгутов на единицу длины, а также угол плетения или угол между жгутом и осью экрана. Типичная оплетка с узором плетения елочкой показана на рис. 7.13. На рис. 7.14 узел плетения показан в увеличенном виде для пояснения параметров плетения и щелей.

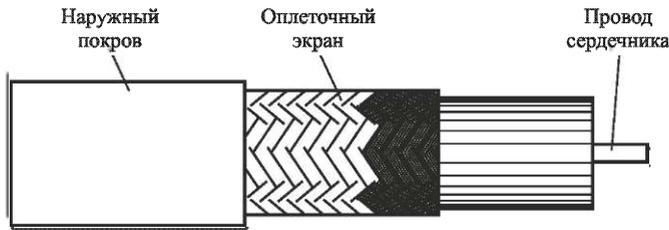


Рис. 7.13. Типовой оплеточный экран

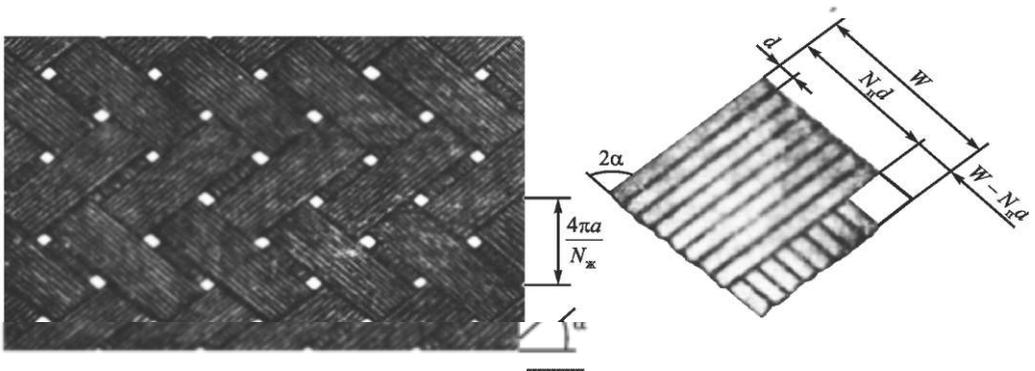


Рис.7.14. Параметры типового оплеточного экрана

**Параметры плетения.** Параметры оплеточного экрана могут быть выражены через радиус  $a$  экрана, число жгутов  $N_{\text{ж}}$  в оплетке, число пересечений  $n$ , число проволок в жгуте  $N^*$ , диаметр проволоки  $d$  и угол плетения  $\alpha$ .

Основные параметры:

– угол плетения

$$\alpha = \arctg(4\pi an/N_{ж}); \quad (7.79)$$

– заполнение

$$F = nN_{ж} d/\sin \alpha = N_{ж} dN_{ж} /4\pi a \cos \alpha; \quad (7.80)$$

– оптическое перекрытие

$$K = 2F - F^2; \quad (7.81)$$

– объем металла

$$U = \pi^2 adF. \quad (7.82)$$

В этих выражениях и при последующем анализе оплеток предполагается, что диаметр проволоки и размеры щелей малы по сравнению с радиусом экрана, и что радиус экрана мал по сравнению с наименьшей учитываемой длиной волны.

Влияние полей, проникающих через щели в экране, показано на рис. 7.15. Часть магнитного поля на окружности, вызванного током в экране, может проникать через ромбовидную щель и замыкать цепь центрального проводника, вызывая взаимную индукцию между экраном и внутренним проводником. Подобным же образом часть внешнего электрического поля, обусловленного потенциалом экрана, может проникать через щели и наводить заряд на проводнике внутри экрана. Наличие этого заряда подразумевает взаимную емкостную связь между центральным проводником и внешней конструкцией (землей).

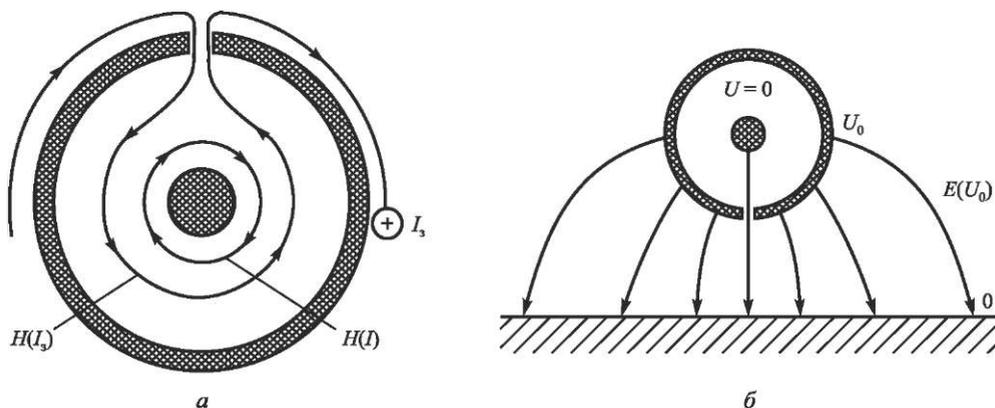


Рис. 7.15. Поток, проникающие через щели в экране:

*а* – магнитный; *б* – электрический

**Полное сопротивление связи и полная проводимость связи.** Полное сопротивление связи оплеточного экрана состоит из двух составляющих, одна из которых учитывает проникновение электромагнитной энергии через экран, а другая – прохождение магнитного поля через ромбовидные щели. Следовательно, выражение для полного сопротивления связи можно записать

$$Z_{св} = Z_d + j\omega M_{12}, \quad (7.83)$$

где

$$Z_d \approx \frac{4}{\pi d^2 N_{\Pi} N_{\text{ж}}} \frac{(1-j) \frac{d}{\delta}}{\operatorname{sh}(1+j) \frac{d}{\delta}}; \quad (7.84)$$

$$M_{12} \approx \begin{cases} \frac{\pi \mu_0}{6 N_{\text{ж}}} (1-K)^{3/2} \frac{e^2}{E(e) - (1-e^2)K(e)}, & \alpha < 45^\circ; \\ \frac{\pi \mu_0}{6 N_{\text{ж}}} (1-K)^{3/2} \frac{e^2 \sqrt{1-e^2}}{K(e) - E(e)}, & \alpha > 45^\circ. \end{cases} \quad (7.85)$$

В этих выражениях  $K$  – оптическое перекрытие;  $N_{\text{ж}}$  – число жгутов,  $\sigma$  – удельная проводимость материалов экрана;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ ;  $K(e)$  и  $E(e)$  – полные эллиптические интегралы первого и второго видов соответственно

$$\frac{1}{\delta} = 1 \sqrt{\pi f \mu \sigma};$$

$$e = \begin{cases} \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}, & \alpha < 45^\circ; \\ \sqrt{1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha}, & \alpha > 45^\circ. \end{cases} \quad (7.86)$$

Составляющая  $Z_d$  получена в предположении, что экран ведет себя, как сплошная труба, имеющая то же сопротивление на единицу длины, что и оплеточный экран, и те же высокочастотные характеристики, что и трубчатый экран толщиной, равной диаметру проволоки. Член, содержащий взаимную индуктивность, получен в предположении, что оплеточный экран ведет себя как тонкостенный трубчатый экран с эллиптическими отверстиями той же плотности и с той же большой и малой осями, что и у ромбовидных щелей в оплеточном экране. Было установлено, что эти выражения очень точны на низких частотах ( $d/\delta \ll 1$ ), но дают большую погрешность на высоких частотах, когда  $\omega M_{12} \gg |Z_d|$ .

Частотная зависимость отношения модуля полного сопротивления связи оплеточного экрана, рассчитанного по уравнению (7.83), к  $R_0$  для различных значений оптического перекрытия при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $a = 1$  см,  $d = 0,16$  мм,  $N_{\Pi} = 10$  приведена на рис. 7.16. Штриховой линией показана аналогичная зависимость для трубчатого экрана. Полное сопротивление связи приведено к сопротивлению постоянному току на единицу длины

$$R_0 \approx 4/(\pi d^2 N_{\Pi} N_{\text{ж}} \sigma \cos \alpha) = 1/(\pi^2 a d \sigma F \cos^2 \alpha), \quad (7.87)$$

которое также слабо зависит от перекрытия.

Члены  $Z_d$  на частотах значительно ниже 1 МГц и  $\omega M_{12}$  на частотах значительно выше 1 МГц имеют доминирующее значение (см. рис. 7.16).

Полная проводимость связи оплеточного экрана  $Y_{\text{св}} = j\omega C_{12}$ , где

$$C_{12} \approx \begin{cases} \frac{\pi C_1 C_2}{6 \varepsilon N_{\text{ж}}} (1-K)^{3/2} \frac{1}{E(e)}, & \alpha < 45^\circ; \\ \frac{\pi C_1 C_2}{6 \varepsilon N_{\text{ж}}} (1-K)^{3/2} \frac{\sqrt{1-e^2}}{E(e)}, & \alpha > 45^\circ, \end{cases} \quad (7.88)$$

где  $C_1$  – емкость на единицу длины между внутренними проводниками и экраном;  $C_2$  – емкость на единицу длины между экраном и землей или эквивалентным проводником;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость изоляции внутри кабеля.

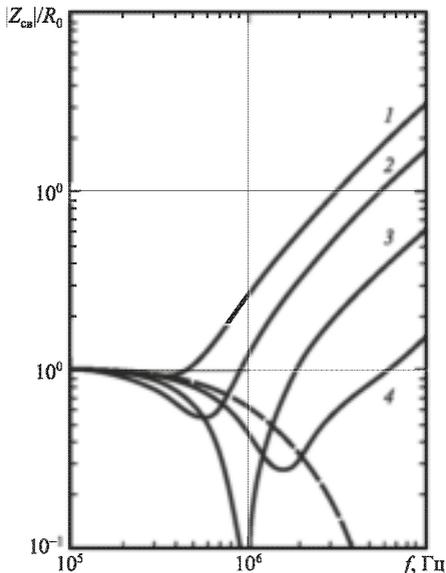


Рис. 7.17. Изменение взаимной емкости и взаимной индуктивности в зависимости от угла плетения при постоянном оптическом перекрытии:

$$1 - C_{12}; 2 - M_{12}$$

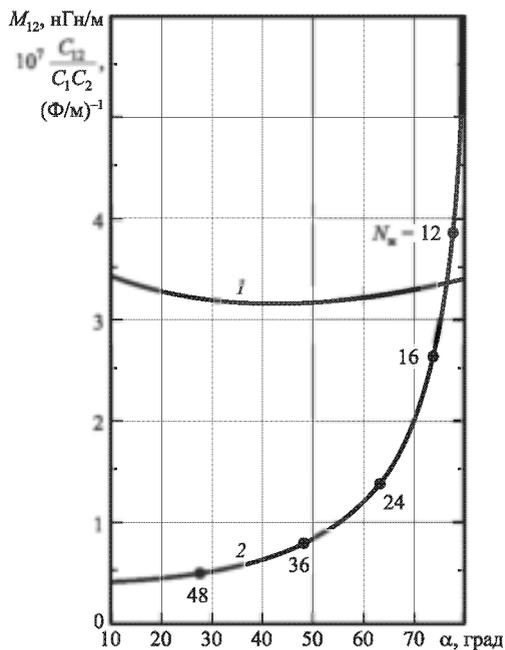
Выражения (7.88) справедливы, если диэлектрическая проницаемость одинакова внутри и вне экрана. Такая ситуация возможна в случае коаксиальных кабелей с воздушной изоляцией без покрытий или кабелей с изоляцией из сплошного диэлектрика внутри и очень толстыми покровами из того же материала снаружи. Если диэлектрическая проницаемость внутреннего диэлектрика  $\epsilon_1$ , а внешнего  $\epsilon_2$ , в выражения для  $C_{12}$  надо внести поправку в виде коэффициента

$$g = \frac{2\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}. \quad (7.89)$$

Для обычных коаксиальных линий связи с полиэтиленовой изоляцией и пренебрежимо тонкими внешними покровами ( $\epsilon_2 = \epsilon_0$ )  $g = 1,4$ . Эти диэлектрики не влияют на взаимную индуктивность  $M_{12}$  (если только они не содержат магнитных включений типа ферритов).

Рис. 7.16. Частотная зависимость модуля отношения полного сопротивления связи оплеточного экрана к  $R_0$ :

1 –  $K = 85,4\%$ ,  $N_{\text{ж}} = 42$ ; 2 –  $K = 89,5\%$ ,  $N_{\text{ж}} = 46$ ;  
3 –  $K = 94,5\%$ ,  $N_{\text{ж}} = 52$ ; 4 –  $K = 97,8\%$ ,  $N_{\text{ж}} = 58$



Изменение  $M_{12}$  и  $C_{12}$  в зависимости от угла плетения при постоянном оптическом перекрытии показано на рис. 7.17. Взаимная индуктивность на единицу длины быстро возрастает с увеличением угла плетения, а взаимная емкость  $C_{12}$  очень мало меняется при изменении угла плетения. Зависимости (см. рис. 7.17) приведены для случая, когда радиус экрана составляет 1 см, диаметр проволоки 0,16 мм, число проволок в жгуте 10, а число жгутов меняется в таких пределах, что оптическое перекрытие остается постоянным, равным 90%.

#### 7.5.4. Внутренние напряжения и токи

Ток и напряжение, наводимые в проводниках, расположенных внутри экрана, током, протекающим в экране, и внешнее напряжение экрана получают путем решения уравнений линии передачи с распределенным источником, если кабель не является коротким по сравнению с самой короткой из рассматриваемых длин волн. Решение для линии передачи с распределенным источником напряжения дано ранее при анализе тока, наводимого в подвесных и подземных кабелях. Распределенный источник создаст напряжение на единицу длины линии передачи, образованной внутренними проводниками и экраном:  $E_z(z, \omega) = I_0(z, \omega)Z_{cb}$ , где  $I_0(z, \omega)$  – ток, наводимый в экране за счет внешних явлений (например, падающая волна, магнитное поле в почве и т.д.);  $Z_{cb}$  – полное сопротивление связи экрана.

Решения для синфазных тока и напряжения, наводимых во внутренних проводниках одним только распределенным источником напряжения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_m(z) &= [K_1 + P(z)]e^{-\gamma z} + [K_2 + Q(z)]e^{\gamma z}; \\ u_m(z) &= Z_{cb} \{ [K_1 + P(z)]e^{-\gamma z} - [K_2 + Q(z)]e^{\gamma z} \}, \end{aligned} \right\} \quad (7.90)$$

где  $\gamma = \sqrt{ZY}$  и  $Z_c = \sqrt{Z/Y}$  – соответственно коэффициент распространения и волновое сопротивление линии передачи, образованной внутренними проводниками и экраном;

$$\left. \begin{aligned} P(z) &= \frac{1}{2Z_c} \int_{z_1}^z e^{\gamma z} E_z(z) dz; \\ Q(z) &= \frac{1}{2Z_c} \int_z^{z_2} e^{\gamma z} E_z(z) dz. \end{aligned} \right\} \quad (7.91)$$

Постоянные  $K_1$  и  $K_2$  определяются исходя из нагрузочных полных сопротивлений  $Z_1$  в точке  $z = z_1$  и  $Z_2$  в точке  $z = z_2$  (где  $z_1 \leq z \leq z_2$ ):

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \rho_1 e^{\gamma z_1} \frac{\rho_2 P(z_2) e^{-\gamma z_2} - Q(z_1) e^{\gamma z_2}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}; \\ K_2 &= \rho_2 e^{\gamma z_2} \frac{\rho_1 Q(z_1) e^{\gamma z_1} - P(z_2) e^{-\gamma z_1}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.92)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – коэффициенты отражения:

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_b}{Z_1 + Z_b}; \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_b}{Z_2 + Z_b}. \quad (7.93)$$

Обычно интерес представляют токи и напряжения на концах кабеля, поскольку именно они оказывают влияние на оборудование, подключенное к кабелю (хотя, в некоторых случаях, когда речь идет о длинных кабелях, подвергающихся воздействию больших волн тока в экране, может представлять интерес и напряжение вдоль кабеля для определения достаточности электрической прочности изоляции). Когда рассматриваются напряжения и токи на конце кабеля, выражения для них могут быть значительно упрощены, поскольку  $Q(z_2) = P(z_1) = 0$ :

$$i_m(z_1) = (1 - \rho_1) \frac{Q(z_1)e^{\gamma z_2} - \rho_2 P(z_2)e^{-\gamma z_2}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}} \quad (7.94)$$

и  $u_m(z_1) = -i_m(z_1)Z_1$  на одном конце, а

$$i_m(z_2) = (1 - \rho_2) \frac{P(z_2)e^{-\gamma z_1} - \rho_1 Q(z_1)e^{\gamma z_1}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}} \quad (7.95)$$

и  $u_m(z_2) = -i_m(z_2)Z_2$  на другом конце.

Подобным же образом для внутренних тока и напряжения, когда воздействует только распределенный источник тока:

$$\left. \begin{aligned} J(z, w) &= -Y_{cb} u_0(z, w); \quad E_z(z, w) = 0; \\ i_e(z) &= \frac{1}{Z_B} \left\{ [K_{1e} + P_e(z)] e^{-\gamma z} - [K_{2e} + Q_e(z)] e^{\gamma z} \right\}; \\ u_e(z) &= [K_{1e} + P_e(z)] e^{-\gamma z} + [K_{2e} + Q_e(z)] e^{\gamma z}, \end{aligned} \right\} \quad (7.96)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P_e(z) &= \frac{Z_B}{2} \int_{z_1}^z J(z) e^{\gamma z} dz; \\ Q_e(z) &= \frac{Z_B}{2} \int_z^{z_2} J(z) e^{-\gamma z} dz; \end{aligned} \right\} \quad (7.97)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{1e} &= \rho_1 e^{\gamma z_1} \frac{Q_e(z_1)e^{\gamma z_2} + \rho_2 P_e(z_2)e^{-\gamma z_2}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}; \\ K_{2e} &= \rho_2 e^{\gamma z_2} \frac{P_e(z_2)e^{\gamma z_1} + \rho_1 Q_e(z_1)e^{-\gamma z_1}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.98)$$

Здесь  $Z_B$  – волновое сопротивление, определенное ранее.

На концах кабеля

$$\left. \begin{aligned} u_e(z_1) &= (1 + \rho_1) \frac{Q_e(z_1)e^{\gamma z_2} + \rho_2 P_e(z_2)e^{-\gamma z_2}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}, \\ \text{или} \quad u_e(z_1) &= -i_e(z_1)Z_1; \\ u_e(z_2) &= (1 + \rho_2) \frac{P_e(z_2)e^{\gamma z_1} + \rho_1 Q_e(z_1)e^{-\gamma z_1}}{e^{\gamma(z_2 - z_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(z_2 - z_1)}}, \\ \text{или} \quad u_e(z_2) &= -i_e(z_2)Z_2. \end{aligned} \right\} \quad (7.99)$$

Если к значениям тока и напряжения, обусловленным полной проводимостью связи из уравнения (7.95), добавить значения тока и напряжения, обусловленные полным сопротивлением связи из уравнения (7.99), получим суммарный ток и суммарное напряжение, наводимые во внутренних проводниках:

$$\left. \begin{aligned} u(z) &= i_m(z) + i_e(z); \\ u(z) &= u_m(z) + u_e(z). \end{aligned} \right\} \quad (7.100)$$

### 7.5.5. Измерение параметров экранирования

**Полная проводимость и полное сопротивление связи.** Полное сопротивление связи кабельного экрана по уравнению (7.65) численно равно напряжению холостого хода, наводимому на единице длины проводника током в экране, равным 1 А. Полная проводимость связи представляет собой ток короткого замыкания, наводимый внешним потенциалом экрана, равным 1 В на единице длины кабеля. Полную проводимость можно измерить в лаборатории с помощью схемы, в которой экран кабеля является внутренним проводником коаксиальной линии передачи, образованной вспомогательным коаксиальным проводником и исследуемым экраном кабеля. С одного конца к линии передачи подключен источник, а на другом конце линия замкнута накоротко или разомкнута (рис. 7.18).

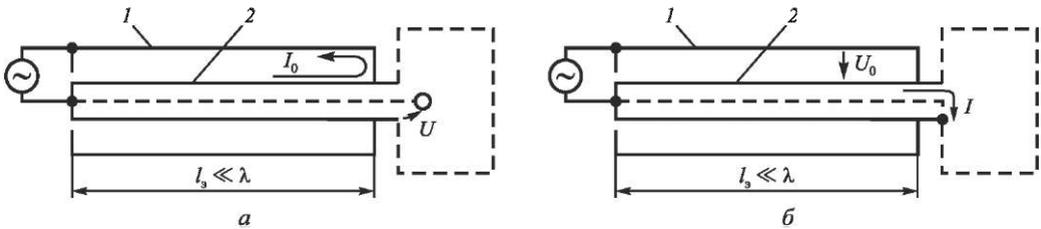


Рис. 7.18. Схема преобразования синфазного напряжения:

*а* – полное сопротивление связи; *б* – полная проводимость связи;  
1 – внешний проводник; 2 – экран кабеля

В схеме измерения полного сопротивления связи (рис. 7.18*а*) источник возбуждения обеспечивает протекание тока  $I_0$  через экран при пренебрежимо малом напряжении, а напряжение холостого хода, наводимое на проводнике внутри экрана:

$$U_x \approx I_0 Z_{св} l_s, \quad l_s \ll \lambda. \quad (7.101)$$

В схеме измерения полной проводимости связи (рис. 7.18*б*) источник возбуждения создает напряжение  $U_0$  между экраном кабеля и вспомогательным коаксиальным проводником при пренебрежимо малом токе в экране. Ток короткого замыкания, наводимый в проводнике внутри кабеля:

$$I \approx U_0 Y_{св} l_s, \quad l_s \ll \lambda. \quad (7.102)$$

Измерения проводят при длине экрана  $l_s$ , много меньше длины волны  $\lambda$  воздействующего сигнала.

Когда длина испытуемого образца  $l_s$  сравнима с длиной волны  $\lambda$  воздействующего сигнала, приходится вносить поправки для учета изменения тока и напряжения вдоль

экрана, которые могут привести к появлению как электрического ( $Y_{\text{св}}$ ), так и магнитного ( $Z_{\text{св}}$ ) влияния во время одного и того же измерения. Кроме того, поскольку полная проводимость связи зависит от внешней емкости на единицу длины между экраном и вспомогательным проводником, полная проводимость связи, определяемая из уравнения (7.102), относится только к коаксиальному пути возврата, образованному вспомогательным коаксиальным проводником (см. рис. 7.18б). Для любого другого пути возврата тока экрана, имеющего емкость  $C_2$  на единицу длины по отношению к экрану кабеля, полная проводимость связи на единицу длины

$$Y_{\text{св}} = Y_{\text{свт}} C_2 / C_{2t}, \quad (7.103)$$

где  $C_{2t}$  – емкость на единицу длины между экраном и вспомогательным коаксиальным проводником, используемым в схеме измерения;  $Y_{\text{свт}}$  – полная проводимость связи, измеренная в данной схеме. Ток распределенного источника  $J = -U_0 Y_{\text{св}}$  иногда описывают через внешний заряд  $Q_0$ , т.е.  $J = -Y_{\text{св}} Q_0 / C_2$ .

Испытательное устройство для проведения измерений  $Z_{\text{св}}$  и  $Y_{\text{св}}$  должно быть выполнено таким образом, чтобы свести до минимума паразитное влияние между генератором и измерительными цепями. Обычно это достигается, если разместить указанные части системы в отдельные экраны.

**Эффективность экранирования.** Для определения эффективности экранирования широко используется коэффициент экранирования

$$S = 20 \lg (I_0 / I), \quad (7.104)$$

где  $I_0$  – ток в экране;  $I$  – ток в проводнике внутри экрана.

Для электрически короткого кабеля, имеющего пренебрежимо малую проводимость связи и нагруженного на полные сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  по концам:

$$\frac{I_0}{I} \approx \frac{Z_1 + Z_2}{l Z_{\text{св}}}. \quad (7.105)$$

Однако это отношение не однозначно характеризует экран, поскольку ток  $I$  меняется в широких пределах в зависимости от нагрузочных полных сопротивлений между внутренними проводниками и экраном и от длины кабеля.

Если нельзя пренебречь полной проводимостью связи, а кабель является электрически коротким и нагружен на полные сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$ , то при нагрузке внешней цепи экрана на свое волновое сопротивление  $Z_c$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_0}{I_1} &\approx \frac{Z_1 + Z_2}{l(Z_{\text{св}} + Z_c Z Y_{\text{св}})}, \\ \frac{I_0}{I_2} &\approx \frac{Z_1 + Z_2}{l(Z_{\text{св}} - Z_c Z Y_{\text{св}})}. \end{aligned} \right\} \quad (7.106)$$

Коэффициент экранирования в этом случае зависит от того, на каком конце кабеля измеряется внутренний ток, а также от нагрузочных полных сопротивлений и длины. Если кабель является электрически длинным, то может присутствовать дополнительный эффект направления, обусловленный фазовой дисперсией наводимого тока, распространяющегося к передающему концу.

Важно иметь в виду, что по коэффициенту экранирования, выведенному на основании измерений на одном конце кабеля, можно ошибочно оценить влияние экрана кабеля.

### 7.5.6. Многослойные экраны

Кабели, имеющие более одного экрана, можно анализировать, применяя метод теории линий передачи к каждому экрану для получения тока в следующем экране и так до тех пор, пока не будут учтены все экраны. Однако для определенных классов многослойных экранов можно получить эквивалентные полные проводимость и сопротивление связи, что позволяет рассматривать многослойный экран таким же образом, как однослойный.

**Двухслойные периодически соединяемые экраны.** Двухслойные экраны, слои которых соединяются друг с другом через электрически короткие интервалы, имеют эквивалентное полное сопротивление связи

$$Z_{\text{св}} = \frac{Z_{\text{св}1} Z_{\text{св}2}}{Z_{i1} + Z_{i2} + j\omega L_{12}} \quad (7.107)$$

и эквивалентную полную проводимость

$$Y_{\text{св}} = \frac{Z_{\text{св}1} Z_{\text{св}2} \gamma_3 l_3}{Y_3 \cdot 12}, \quad (7.108)$$

где  $Z_{i1}, Z_{i2}$  – внутренние продольные сопротивления внутреннего и внешнего экранов;  $Z_{\text{св}1}, Z_{\text{св}2}$  – сопротивления связи внутреннего и внешнего экранов;  $Y_{\text{св}1}, Y_{\text{св}2}$  – проводимости связи внутреннего и внешнего экранов;  $Y_3$  – шунтирующая проводимость между экранами;  $\gamma_3$  – коэффициент распространения цепи экран–экран;  $l_3$  – расстояние между точками соединения экранов;  $L_{12}$  – индуктивность цепи экран–экран.

Величины  $Z_{i1}, Y_{\text{св}1}, Z_{i2}, Y_{\text{св}2}$  и  $L_{12}, L_3$  даны на единицу длины. Внутренние полные сопротивления трубчатых экранов приведены в табл. 7.4.

Индуктивность

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a_2}{b_1}, \quad (7.109)$$

где  $b_1$  – внешний радиус внутреннего экрана;  $a_2$  – внутренний радиус внешнего экрана.

Полная проводимость

$$Y_3 = j\omega C_3 = j\omega \frac{2\pi\epsilon_i}{\ln\left(\frac{a_2}{b_1}\right)}. \quad (7.110)$$

**Двухслойные трубчатые экраны.** Если оба экрана трубчатые, полная проводимость связи  $Y_{\text{св}} = 0$ , поскольку трубчатый экран является идеальным электрическим экраном.

Сопротивление связи при электрически коротком экране

$$Z_{\text{св}} = \frac{R_{01} R_{02} \frac{\gamma_1 T_1}{\text{sh } \gamma_1 T_1} \frac{\gamma_2 T_2}{\text{sh } \gamma_2 T_2}}{R_{01} \gamma_1 T_1 \text{cth } \gamma_1 T_1 + R_{02} \gamma_2 T_2 \text{cth } \gamma_2 T_2 + j\omega L_{12}}, \quad (7.111)$$

Индекс 1 в формуле (7.111) относится к внутреннему экрану, а индекс 2 – к внешнему.

На низких частотах  $\omega L_{12} \rightarrow 0$  и  $\gamma T \text{cth } \gamma T \approx \gamma T / \text{sh } \gamma T \approx 1$ , в результате чего

$$Z_{\text{св}} = \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}}. \quad (7.112)$$

На высоких частотах сопротивление связи уменьшается даже быстрее, чем в случае однослойного трубчатого экрана.

Пример. Кабель диаметром 5 см с медным внешним экраном толщиной 0,5 мм, внутренним стальным экраном диаметром 4 см и толщиной 0,25 мм и с полиэтиленовой изоляцией ( $\epsilon_r = 2,3$ ) положен так, что экраны соединяются друг с другом через 300 м. Для внешнего экрана  $c\mu_0\sigma T^2/\sqrt{\epsilon} = 3,72$  км, так что расстояние 300 м между соединениями можно считать электрически малым. Кроме того:

$$R_{01} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}; \quad R_{02} = 2,19 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м};$$

$$f_{\delta 1} = 1,35 \text{ кГц}; \quad f_{\delta 2} = 17,5 \text{ кГц}.$$

Следовательно, на частотах значительно ниже 1 кГц, эквивалентное сопротивление связи

$$Z_{\text{св}} = \frac{R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м},$$

т.е. немногим меньше полного сопротивления связи медного экрана.

Полное сопротивление связи начинает уменьшаться на частотах выше 1,35 кГц, поскольку стальной экран на частотах выше  $f_{\delta}$  имеет толщину больше эквивалентной глубины проникновения.

**Двухслойные экраны со щелями.** Эквивалентное сопротивление связи двухслойного оплеточного экрана при  $\gamma l \ll 1$

$$Z_{\text{св}} = \frac{R_{01}R_{02} \left( \frac{\gamma_1 d_1}{\text{sh } \gamma_1 d_1} + j\omega \frac{M_1}{R_{01}} \right) \left( \frac{\gamma_2 d_2}{\text{sh } \gamma_2 d_2} + j\omega \frac{M_2}{R_{02}} \right)}{R_{01}\gamma_1 d_1 \text{cth } \gamma_1 d_1 + R_{02}\gamma_2 d_2 \text{cth } \gamma_2 d_2 + j\omega L_{12}}. \quad (7.113)$$

Это выражение можно значительно упростить для двух частотных областей. Когда  $|\gamma d| \ll 1$  (низкие частоты) для обоих экранов,  $\gamma d/\text{sh } \gamma d \approx \gamma d \text{cth } \gamma d \approx 1$ , и в этой частотной области как  $j\omega M$ , так и  $j\omega L$  обычно невелики по сравнению с  $R_0$  (если только оплетка экрана не является очень прозрачной), в результате чего

$$Z_{\text{св}} \approx \frac{R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{02}}. \quad (7.114)$$

На высоких частотах, т.е. когда  $\omega M$  и  $\omega L$  значительно больше, чем члены, обуславливающие проникновение энергии через экран, и  $\omega L_{12} \gg Z_{\delta 1}, Z_{\delta 2}$ :

$$Z_{\text{св}} \approx j\omega M_1 M_2 / L_{12}. \quad (7.115)$$

Частотные области, когда справедливы эти приближения, показаны на рис. 7.16. Низкочастотное приближение относится к области, где приведенное сопротивление связи обоих экранов постоянно и равно примерно 1,0, а высокочастотное приближение относится к области, где сопротивление связи пропорционально частоте. Поскольку индуктивность зазора  $L_{12}$  значительно больше, чем взаимная индуктивность  $M_1 \approx M_2$ , высокочастотное сопротивление связи двухслойного оплеточного экрана значительно меньше, чем у однослойного. Низкочастотное полное сопротивление связи двухслойного оплеточного экрана только в 2 раза отличается от сопротивления связи однослойного, поскольку сопротивление постоянному току двухслойного экрана составляет приблизительно половину сопротивления однослойного.

Улучшение высокочастотного сопротивления связи экрана достигается добавлением второго экрана

$$\frac{Z_{св}}{Z_{св1}} = \frac{j\omega M_1 M_2 / L_{12}}{j\omega M_1} = \frac{M_2}{L_{12}} \quad (7.116)$$

Проводимость двухслойного оплеточного экрана

$$Y_{св} = j\omega \frac{C_{12}^1 C_{12}^2 (\gamma_3 l_3)^2}{C_3} \quad (7.117)$$

где  $C_{12}^1$  и  $C_{12}^2$  – взаимные емкости внутреннего и внешнего экранов соответственно;  $C_3$  – емкость между экранами (все параметры – на единицу длины).

Поскольку  $\gamma_3 l_3 \ll 1$ , эквивалентная проводимость связи двухслойного оплеточного экрана обычно пренебрежимо мала.

**Длинные кабели с изолированными экранами.** Сопротивление связи длинных двухслойных экранов, изолированных друг от друга:

$$Z_{св} = \left[ Z_{св2} - Y_{св2} Z_{сэ-э} Z_{сэ-э} \left( \frac{\gamma_{э-э}}{\gamma_{э-э}} \right) \right] \frac{Z_{св1}}{Z_{сэ-э} \gamma_{э-э} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_{э-э}}{\gamma_{э-э}} \right)^2 \right]}, \quad (7.118)$$

а проводимость связи

$$Z_{св} = - \left[ Z_{св2} Z_{сэ-э} Z_{сэ-э} - Z_{св1} \left( \frac{\gamma_{э-э}}{\gamma_{э-э}} \right) \right] \frac{Z_{св1}}{Z_{сэ-э} \gamma_{э-э} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_{э-э}}{\gamma_{э-э}} \right)^2 \right]}, \quad (7.119)$$

где  $Z_{сэ-э}$  – волновое сопротивление цепи экран–экран;  $Z_{сэ-з}$  – волновое сопротивление цепи внешний экран–земля;  $\gamma_{сэ-з}$  – коэффициент распространения цепи внешний экран–земля;  $\gamma_{сэ-э}$  – коэффициент распространения цепи внешний экран–экран.

### 7.5.7. Заземление экранов кабелей

Для снижения высокочастотной помехи общего вида требуется, чтобы экран кабеля был заземлен с обеих сторон или, что более важно, присоединен к заземленным корпусам оборудования.

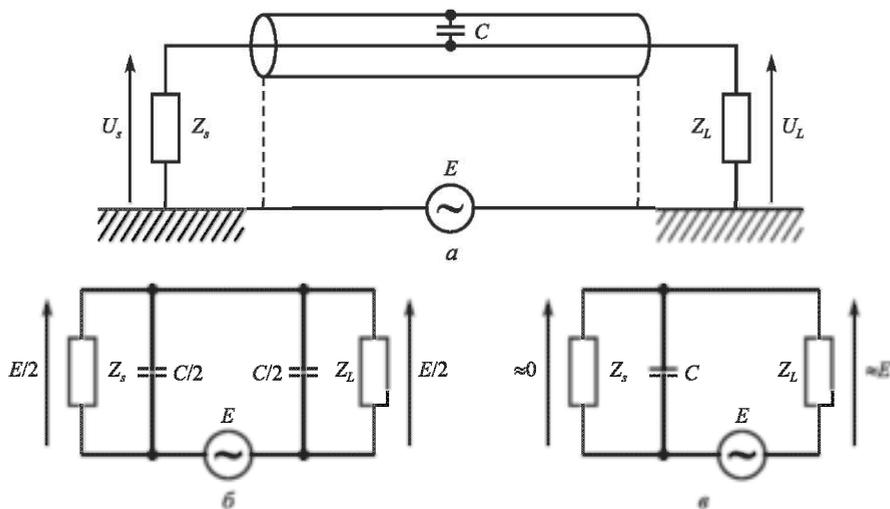
Для ослабления только емкостной связи при низких частотах (50/60 Гц, звуковые частоты) достаточно заземлить экран на одном из его концов.

Основной эффект от экранирования (ослабление синфазного напряжения) достигается в основном на высоких частотах (более 10 кГц). Применение симметрирования проводников более эффективно (ослабление противофазного напряжения) на низких частотах (менее 100 кГц).

Очевидно, что совместное применение экранирования и симметрирования даст наилучшие результаты. Синфазное напряжение частично преобразуется в противофазное напряжение из-за некоторой несимметрии кабелей и различий в сопротивлениях нагрузки, что делает весьма сложной задачу их определения.

Отметим, что в зависимости от соотношения нагрузочных сопротивлений, степени симметрии цепей и способа заземления экрана, напряжение синфазной помехи различным образом распределяется между разными концами кабеля и может преобразовываться в противофазную помеху.

**Синфазное напряжение помехи на низких частотах.** Рассмотрим цепь, где продольное напряжение  $E$  приложено к экранированному проводнику, к концам которого присоединены сопротивления нагрузки  $Z_s$  и  $Z_L$  (рис. 7.19).



**Рис. 7.19. Преобразование синфазного напряжения в противофазное:**

$a$  – цепь передачи сигнала по кабелю;  $б$  – схема замещения при заземлении экрана кабеля на обоих концах;  $в$  – схема замещения при заземлении экрана кабеля на одном конце

Термин «продольное» обычно обозначает «между концами цепи или линии электропередачи (или ее частей)». Данное понятие действительно только на низких частотах или если путь измерения хорошо определен. В данном случае путь измерения проходит вдоль проводника внутри экрана. Таким образом, напряжение  $E$  представляет собой падение напряжения на экране, определяемое его взаимным передаточным сопротивлением. Другими словами, оно включает в себя коэффициент ослабления, привнесенный экраном.

Однако если экран заземлен только на одном конце, то коэффициент ослабления отсутствует, а продольное напряжение представляет собой действительное напряжение, наведенное в контуре, образованном проводником и землей, или вызванное падением напряжения на активном сопротивлении грунта.

Предположим, что проводимость экрана  $j\omega C$  много больше величин  $1/Z_s$  и  $1/Z_L$ . Также предположим, что продольное сопротивление проводника (включая обратный провод)  $Z = R + j\omega L$  много меньше по значению сопротивлений нагрузки  $Z_s$  и  $Z_L$ . Если экран заземлен на обоих концах, то его емкость поровну делится между обоими концами и синфазные напряжения  $U_L$  и  $U_s$  приблизительно равны  $E/2$ . Если экран заземлен только на одном конце, то его емкость шунтирует сопротивление на соответствующем конце кабеля и полное продольное напряжение переходит на другой конец цепи в виде синфазного напряжения. Аналогичная ситуация происходит в случае, если проводник заземлен на одном конце (т.е.  $Z_s$  или  $Z_L = 0$ ) или если цепь на одном из концов защищена устройством защиты от перенапряжений. Если цепь на обоих концах защищена устройствами, сопротивлением  $Z$  больше нельзя пренебрегать по сравнению с сопротивлениями  $Z_s$  и  $Z_L$ , что приведет к равенству напряжений  $U_L$  и  $U_s$  разности напряжений на устройствах защиты.

Во множестве случаев зависимость коэффициента преобразования продольного напряжения в синфазное от отношения сопротивлений нагрузки по концам кабеля имеет большое значение. Особенно важно в случаях, где имеются разделительные трансформаторы с заземленной или незаземленной средней точкой на стороне линии.

**Противофазное напряжения помехи на низких частотах.** На низких частотах заземление экранов кабелей играет очень важную роль в снижении противофазных напряжений помехи (или продольных напряжений, или обычных напряжений), вызванных несовершенством симметрирования цепей (рис. 7.20).

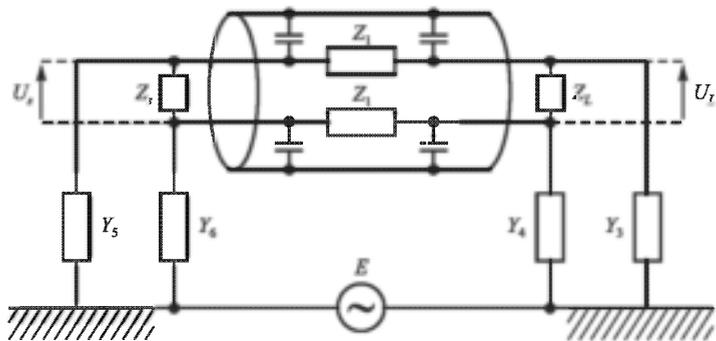


Рис. 7.20. Преобразование синфазного напряжения низкой частоты в противофазное напряжение в несимметрированной цепи

В зависимости от сопротивлений нагрузки по концам кабеля и степени рассогласования сопротивлений как нагрузки, так и самих проводников, на каждом из концов кабеля будут появляться различные противофазные напряжения  $U_L$  и  $U_s$ .

Проанализируем два наиболее важных вывода. При неравенстве сопротивлений (проводимостей) на одном из концов ( $Y_3, Y_4$  или  $Y_5, Y_6$ ) противофазные напряжения будут минимальными в месте заземления экрана, максимальными при заземлении экрана на противоположном конце и средними – при заземлении экрана на обоих концах. Причиной этого является то, что заземление экрана на одном конце приводит к локализации емкости между экраном и проводником на этом же конце экрана. Соединенные параллельно с неравными сопротивлениями равные емкости уменьшают относительную несимметрию. Чем меньше входные сопротивления ( $Z_L, Z_s$ ), тем ниже возникающие противофазные напряжения.

**Правила заземления экранов кабелей.** Все сказанное позволяет сформулировать следующие правила:

- экраны сигнальных и силовых кабелей следует заземлять с *обоих* концов. Этот способ является наилучшим для снижения синфазных помех, особенно на средних и высоких частотах. Коэффициент снижения остается значительным (т.е. много меньше 1) и на низких частотах, если при этом в состав экрана входят магнитные материалы (сталь, пермаллой, феррит);
- экраны сигнальных кабелей следует заземлять только на *одном* конце в следующих случаях:
- *если ожидается протекание по экранам кабелей больших токов.* Данная ситуация может возникать при КЗ в неэкранированном силовом кабеле или в отсутствие качественного контура заземления (связь через общее сопротивление). Однако следует помнить, что эффект снижения помех обусловлен именно

протекающими по экрану токами. По этой причине всегда необходимо заземлять экран с обоих концов, а его параметры следует подбирать так, чтобы он мог выдерживать достаточно большие токи. Если это невозможно, то следует параллельно экрану подключать заземленный проводник или усилить контур заземления;

- если цепь используется для передачи низкочастотных сигналов низкого уровня и существует значительная несимметрия кабеля по отношению экрану или к земле. В данном случае экран должен быть заземлен на том конце кабеля, где несимметрия наибольшая или где цепь уже заземлена. Все цепи экранированного кабеля должны заземляться на том же конце. Если указанное сделать невозможно, необходимо выполнить гальваническую или частотную развязку цепей (использовать оптическую развязку, трансформаторы, фильтры и т.п.). Для длинных линий экран следует заземлять на том конце, где желательнее было бы получить наибольшее снижение противозаземленной помехи;
- при двойном экранировании кабелей рекомендуется заземление через емкость или устройство защиты от перенапряжений. При этом с двух сторон заземлять только внешний экран.

Кабель с одинарным экраном, у которого один конец заземляется непосредственно, а другой через конденсатор (для предотвращения циркуляции токов низкой частоты) или через устройство защиты от перенапряжений для того, чтобы по экрану протекали только токи КЗ или токи молнии.

На рис. 7.21 показаны возможные способы выполнения заземления экранов, являющиеся результатом указанных ранее рассуждений. Каждый способ заземления соответствует некоторому четко определенному набору ситуаций, привязанных к различным типам обычно используемых на электростанциях и подстанциях полезных сигналов.

Электромагнитное воздействие оказывает влияние на оборудование непосредственно или, что бывает чаще, через кабели. В последнем случае уровень помех и порог невосприимчивости зависят, в основном, от типа кабеля и способа подключения и вида передаваемого сигнала.

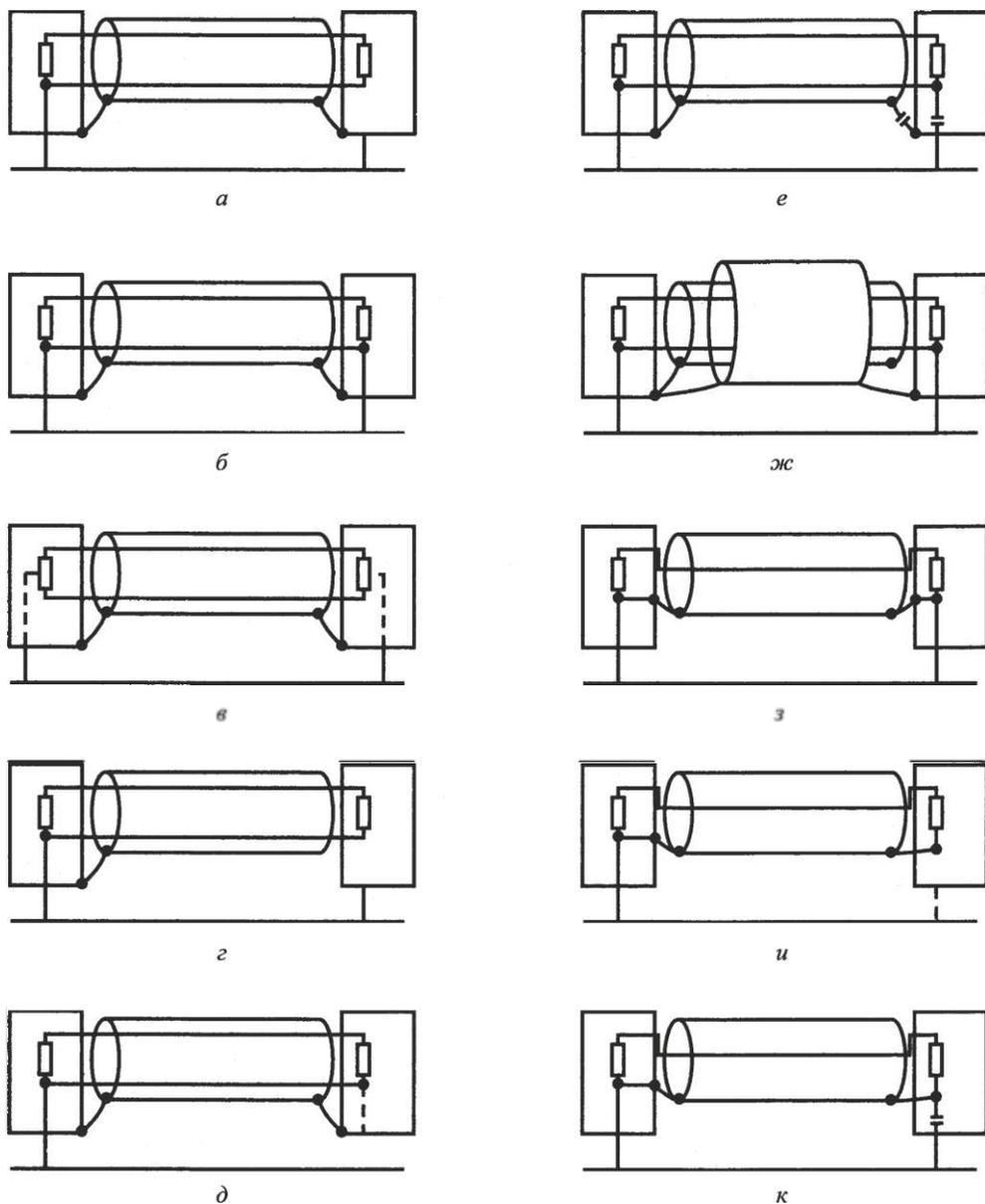
Классификация сигналов, состоящая из четырех классов, приведенных в порядке убывания чувствительности к электромагнитным возмущениям представлена в табл. 7.6.

Следует отметить, однако, что хотя в данной классификации цифровые и аналоговые сигналы отнесены к одному типу, подобное сравнение имеет некоторые ограничения вследствие того, что цифровые и аналоговые системы на практике ведут себя совершенно по-разному.

На рис. 7.21 приведены принципиальные, а не монтажные схемы. Очевидно, что любая симметричная цепь должна выполняться в соответствии с правилами, приведенными ранее. В частности, симметричные цепи должны быть выполнены витой парой, а заземляющие проводники должны иметь возможно меньшую длину (или даже быть коаксиальными).

Рассмотрим область применения различных способов заземления жил и экранов кабелей.

*Схема на рис. 7.21а.* Это наиболее часто рекомендуемый способ, при котором сигнальные цепи заземлены на одном конце во избежание появления помех промышленной частоты, а экран заземлен на обоих концах для наилучшего снижения высокочастотных помех.



**Рис. 7.21. Практические способы заземления сигнальных жил и экранов кабелей:**

*а* – хорошее для ослабления синфазных высокочастотных помех и плохое при несимметричных цепях, чувствительных к низкочастотным помехам; *б* – хорошее для высокочастотных цепей с хорошей поверхностью опорного потенциала и плохое при значительных продольных низкочастотных помехах; *в* – хорошее для ослабления помех во всем диапазоне частот; *г*, *д* – хорошее для передачи сигналов низкой частоты и плохое при значительных синфазных помехах; *е* – хорошее для ослабления помех высокой и низкой частоты; *ж* – обеспечивает хорошую защиту от помех во всем диапазоне частот; *з* – хорошее для цепей с сигналами СВЧ при качественной сети заземления и плохое при наличии значительных продольных возмущений; *и* – хорошее для коротких цепей с сигналами СВЧ; *к* – хорошее экранирование помех высокой частоты

**Классификация типовых сигналов  
в порядке уменьшения чувствительности к внешним возмущениям**

Класс	Вид сигнала	Обычный уровень	Типичный частотный диапазон
1	а. Цифровой высокоскоростной низкого уровня, например, RS422/V11, G703, Ethernet	0,1–5 В	> 20 кГц
	б. Широкополосный аналоговый, например, от измерителей потока нейтронов	10 мкВ–1 В	< 10 МГц
2	а. Цифровой низкоскоростной низкого уровня, например, от импульсных генераторов для измерений скорости или положения, RS232/V28	< 20 В	< 20 кГц
	б. Аналоговый низкочастотный низкого уровня, например, от датчиков измерения температуры или вибрации	< 1 В	< 1 кГц
3	а. Дискретные среднего уровня, например, управления или указания	> 10 В	< 100 Гц
	б. Аналоговые среднего уровня, например, от датчиков технологического контроля	1–10 В 4–20 мА	< 100 Гц
4	а. Дискретные высокого уровня, например, управления выключателями и разъединителями	> 50 В	< 100 Гц
	б. Аналоговые высокого уровня от трансформаторов тока и напряжения	> 10 В, > 20 мА	< 1 кГц

Данная схема широко используется для подключения оборудования на РУ силовых подстанций (сигналы класса 4 в табл. 7.6) и для подключения кабелей с сигналами управления или цифровыми сигналами среднего уровня на электростанциях (сигналы класса 3).

Схема не подходит для подключения кабелей с чувствительными сигналами низкой частоты (сигнал класса 2б) в асимметричных (несимметричных) цепях; схема также мало подходит для высокоскоростных цифровых цепей, не имеющих опорного потенциала земли (сигнал класса 1а).

Схема на рис. 7.21б. При данной схеме подключения как экран, так и сигнальные жилы заземляют с обеих сторон.

Данная схема является наилучшим решением для высокочастотных цепей (сигнал класса 1 в табл. 7.6), но требует наличия очень хорошей (эквипотенциальной) сети заземления, которая на практике может иметь место в сетях малых размеров, расположенных в одном здании.

В действительности любой продольный потенциал земли  $E$ , вне зависимости от причин его появления, даже будучи снижен за счет экранирования, все равно появится в виде синфазной помехи на обоих концах (значение зависит от соотношения сопротивлений нагрузки).

Однако в данной конфигурации синфазное и противофазное напряжения идентичны друг другу, вследствие чего дальнейшего снижения помехи не произойдет. Таким образом, зная, что на низких частотах коэффициент экранирования не может быть

много меньше единицы, становится очевидным, что данную схему следует избегать, если по цепи передаются сигналы низкой частоты или ожидается появление значительных потенциалов заземлителя на низких частотах.

Поэтому обычно предпочтение отдается симметрированным схемам соединения (рис. 7.21в) или схемам с разделением сигналов низкой и высокой частоты (рис. 7.21д).

*Схема на рис. 7.21в.* В данной схеме используется принцип симметрирования цепи, при котором присоединения оборудования и соответствующие связи с сигнальными цепями выполняются симметрично относительно земли. В такой цепи среднюю точку можно либо заземлять, либо не заземлять.

Данная схема обычно используется для цепей дистанционного управления, имеющих большую длину.

Экран кабеля заземлен с обеих сторон и обеспечивает экранирование от продольных возмущений. В действительности единственным способом уменьшения низкочастотной помехи в данной схеме является использование проводников (с учетом обратного провода в земле), имеющих большие сопротивления, чем сопротивления нагрузки. Так как активная составляющая данного сопротивления обычно очень мала, увеличению поддается только индуктивная составляющая, например, при помощи надетого на проводник кольца из магнитного материала. Этот способ хорошо известен и используется для достижения приемлемого коэффициента экранирования на низких частотах. Реализация данной схемы требует больших затрат, но в то же время позволяет избавиться от помех во всем диапазоне частот – от низких (за счет симметрирования) до высоких (при экранировании) и поэтому рекомендуется к применению при передаче сигналов любого типа.

*Схемы на рис. 7.21г, д* – это обычные схемы соединения для передачи сигналов низкой частоты (класса 2а в табл. 7.6) при наличии низкочастотных возмущений, позволяющие удерживать значение противофазной помехи на низком уровне (несимметричная цепь).

Данные схемы также могут использоваться для цепей, к незаземленному концу (не защищенному от продольных помех) которых подключены только пассивные либо слабо подверженные помехам элементы.

При сравнении этих схем видно, что схема на рис. 7.21д с незаземленным корпусом оборудования обеспечивает большую помехозащищенность, но может вызвать проблемы в плане электробезопасности (появление значительных напряжений прикосновения). Данная схема обычно неприменима при наличии вблизи заземленного иного оборудования.

*Схема на рис. 7.21е.* В данной схеме ослабление механизма связи между токами низкой и высокой частоты достигается за счет конденсаторов, позволяющих получить снижение помех высокой частоты при двойном заземлении без опасений появления противофазных помех низкой частоты вследствие несимметричности цепи.

Заземление сигнальной цепи на высоких частотах может происходить за счет паразитных емкостей или включения конденсаторов для ослабления механизма связи.

*Схема на рис. 7.21ж* объединяет в себе достоинства схем на рис. 7.21а, г, обеспечивая хорошую защиту от помех во всем диапазоне частот. Следовательно, схема может использоваться для передачи низкочастотных сигналов низкого уровня (класса 2 в табл. 7.6) при сложной ЭМО.

*Схема на рис. 7.21з* содержит коаксиальный кабель, заземленный на обоих концах. Она обычно используется для передачи сигналов высокой частоты оборудованию, не подверженному воздействию помех низкой или высокой частоты, в частности,

радиооборудованию, работающему в диапазоне СВЧ, рабочие частоты которого много выше частот обычно встречающихся помех.

Такая схема также часто используется для передачи высокоскоростных цифровых сигналов на небольшие расстояния (несколько десятков метров) при наличии хорошего заземлителя (см. рис. 7.21б).

Схема применима и при больших расстояниях, если взаимное передаточное сопротивление невелико, токи помехи ограничены наличием хорошего заземлителя или заземленного проводника, параллельного кабелю.

Схема на рис. 7.21и с коаксиальным кабелем и заземлением на одном конце применяется везде, где токи помех низкой частоты по внешнему проводнику могут повлиять на полезный сигнал.

Примером такого случая может быть соединение отдельных заземлителей. Кроме того, данное соединение может использоваться для подключения переносного оборудования, например видеокамер, мониторов, и т.п.

При необходимости переносное оборудование можно заземлять через конденсатор.

Очевидно, что подобно схеме на рис. 7.21ж, использование коаксиальных трехпроводных (триаксиальных) кабелей может иногда помочь решить все возможные проблемы помехозащищенности и, таким образом, может быть рекомендовано для очень чувствительных сетей, используемых, например для передачи сигналов класса I в табл. 7.6.

Схема на рис. 7.21к подобно схеме на рис. 7.21е, обеспечивает хорошее экранирование высоких частот без вредных воздействий, связанных с протеканием токов низкой частоты.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Назовите методические основы расчета электромагнитных воздействий на кабельные линии.
2. Охарактеризуйте формулы для линии передачи в общем виде.
3. Охарактеризуйте формулы для идеальной линии.
4. Охарактеризуйте формулы для линий с малым затуханием.
5. Как осуществляется взаимодействие электромагнитных полей с почвой?
6. Проанализируйте коэффициент распространения электромагнитной волны.
7. Проанализируйте формулы для линии передачи, подвешенной над землей с распределенным источником возбуждающего поля.
8. Нарисуйте элемент эквивалентной линии электропередачи, расположенной над землей.
9. Опишите волновое сопротивление подземного кабеля.
10. В чем состоят принципиальные различия условий помех в подвешенных и подвесных кабелях?
11. Нарисуйте элемент линии передачи, образованной подземным кабелем и землей.
12. Как выполняются экраны кабелей?
13. Как изображается эквивалентная схема внутренней цепи экранированного кабеля с учетом полного сопротивления и полной проводимости связи?
14. Изобразите схематически напряжения и токи в экранированном кабеле.
15. Назовите отличительные особенности трубчатых и оплеточных экранов. Опишите ток и напряжение, наводимые в проводниках, расположенных внутри экрана.
16. Что такое многослойные экраны?
17. Что такое синфазные помехи?
18. Что такое противофазные помехи?
19. Назовите основные правила заземления экранов.
20. Изложите в обобщенном виде практические методы заземления экранов и жил.
21. Как измеряются параметры экранирования?

## ГЛАВА 8

---

---

# ЭКРАНЫ

---

---

### 8.1. Дифференциальные уравнения Максвелла. Эквивалентная глубина проникновения поля

Аналитический расчет экранов требует решения уравнений Максвелла. В результате решения получают напряженности электрических и магнитных полей, а по отношению напряженностей перед экраном и за ним определяют эффективность экранирования. Этот путь обеспечивает наиболее глубокое понимание принципов действия экранов.

В данной главе по признаку постепенного усложнения рассмотрены (по Кадену) аналитические решения для следующих экранов:

- из двух параллельных пластин;
- цилиндрический в продольном поле;
- цилиндрический в поперечном поле;
- тонкостенный сферический.

В связи с тем, что аналитические решения до последнего времени не получили широкого распространения из-за достаточной трудоемкости, в главе указаны приближенные соотношения, полученные из строгого анализа идеализированного поведения экранов. Они полезны для прогнозирования свойств экранов в условиях стационарного и нестационарного воздействий.

В устройствах связи, электронной, микроэлектронной и микропроцессорной технике часть пространства экранируется от электромагнитного поля при помощи металлической оболочки. Электростатическое поле полностью экранируется тонкой металлической фольгой. Экранирующее действие экрана из немагнитного металла в переменном поле определяется наведенными в толще стенок экрана токами и возбужденным этими токами электромагнитным полем. Экранирующее действие возрастает при увеличении частоты и толщины стенок экрана.

Общий метод решения подобных задач состоит в том, что стенки экрана и окружающее их пространство рассматриваются как область, в которой исследуется и рассчитывается электромагнитное поле. При этом интегрируются уравнения Максвелла в области, частью которой является металлическая оболочка экрана.

Единственное ограничение, которое в дальнейшем будет допущено, состоит в том, что длина волны электромагнитного поля значительно больше, чем основные размеры экрана. Это допущение позволяет пренебрегать токами смещения, протекающими по емкостям как в воздухе, так и в металле. В экране будут проходить только токи проводимости с плотностью

$$j = \sigma E,$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость металла экрана;  $E$  – напряженность электрического поля.

Напишем уравнения Максвелла в квазистационарной форме

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}; \quad (8.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H}, \quad (8.2)$$

полагая, что векторы напряженностей магнитного поля  $\mathbf{H}$  и электрического  $\mathbf{E}$  являются периодическими функциями времени с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$ .

Во всех основных задачах экранирования рассматриваемое пространство будет разделено на три области, в каждой из которых интегрируются уравнения Максвелла:

- 1) бесконечное пространство вне экрана;
- 2) экранированная внутренняя область;
- 3) объем стенок экрана.

В первых двух областях, заполненных воздухом, проводимость  $\sigma = 0$ , и по уравнению (8.1)

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0.$$

Отсюда следует, что магнитное поле в этих областях потенциально и обладает скалярным магнитным потенциалом.

Тогда напряженность магнитного поля определится как градиент потенциала  $U$ :

$$\mathbf{H} = \operatorname{grad} U. \quad (8.3)$$

Так как  $\operatorname{div} \operatorname{rot}$  тождественно равна нулю, то из уравнения (8.2) следует, что  $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ , и потенциал  $U$  будет удовлетворять уравнению Лапласа

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U \equiv \nabla^2 U = 0. \quad (8.4)$$

В металлической стенке экрана удельная проводимость  $\sigma$  отлична от нуля, поэтому не обращается в нуль и  $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ . Здесь напряженность магнитного поля нельзя выразить через потенциальную функцию.

Воспользуемся напряженностью электрического поля, для определения которой исключим из уравнений (8.1) и (8.2) напряженность магнитного поля. Зная напряженность электрического поля, легко найти ток в экране, пропорциональный этой напряженности. Отметим, что в большинстве рассматриваемых случаев напряженность  $\mathbf{E}$  имеет единственную компоненту.

Из уравнений (8.1) и (8.2) получим

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (8.5)$$

где  $k^2 = j\omega\mu\sigma$ ;  $k$  – постоянная вихревых токов;  $\tau$  – постоянная времени ( $\tau = \mu/\varepsilon$ ).

Уравнение (8.5) преобразуем при помощи соотношения

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} \equiv \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}.$$

Так как по уравнению (8.1)  $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ , то уравнение (8.5) упрощается

$$\nabla^2 \mathbf{E} = k^2 \mathbf{E}. \quad (8.6)$$

Уравнение (8.6) нельзя использовать для сферических экранов, так как при таких экранах вектор  $\mathbf{E}$  будет иметь поперечно-круговую компоненту. В этих случаях следует вернуться к уравнению (8.5).

Уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{H} = k^2 \mathbf{H} \quad (8.7)$$

можно применить, если  $H$  имеет прямолинейные компоненты, например в случаях плоского экрана.

Постоянная вихревых токов  $k$  в уравнении (8.5) – комплексная величина с равными вещественной и мнимой частями. Вместо нее введем другую, вещественную, величину  $\delta$ , определяемую по формуле

$$\delta = \frac{1+j}{k}, \quad (8.8)$$

имеющую размерность длины, которая представляет собой эквивалентную глубину проникновения. Эквивалентная глубина проникновения – постоянная, характеризующая материал экрана, зависящая также от частоты. Рассчитывается она по формуле

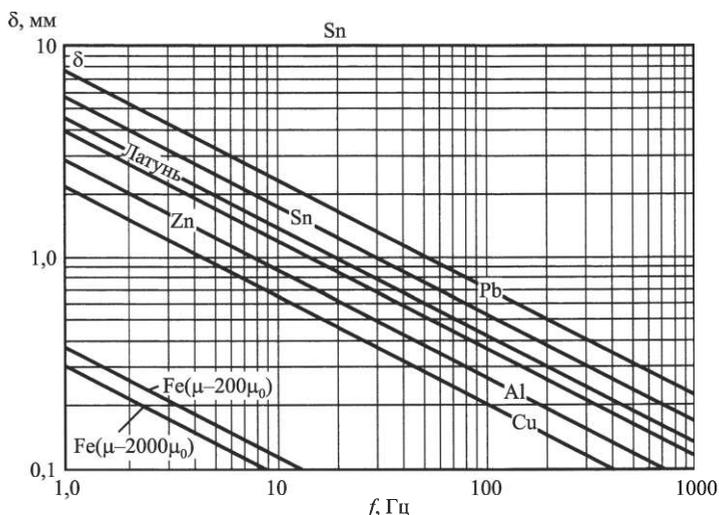
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}, \quad (8.9)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление;  $\mu = \mu_0\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$  – магнитная постоянная, Гн/см.

Физический смысл эквивалентной глубины проникновения  $\delta$ , в соответствии с которым она получила свое наименование, следующий: это толщина стенок цилиндрической трубы кругового сечения, сопротивление которой постоянному току такое же, как сопротивление сплошного цилиндра из того же материала, с тем же диаметром, току высокой частоты.

Эквивалентная глубина проникновения  $\delta$  тем меньше, чем выше частота  $f$  (8.9).

На рис. 8.1 приведены графики зависимости  $\delta$  от частоты для некоторых металлов. Для железа значение  $\delta$  особенно мало, так как относительная магнитная проницаемость входит в знаменатель дроби.



**Рис. 8.1. Эквивалентная глубина проникновения в зависимости от частоты для различных металлов**

Напряженность поля уменьшается до 1% от значения на поверхности на глубине  $4,6\delta$ ; до 10% при  $2,3\delta$ ; до  $1/e$  при  $\delta$  (здесь  $e$  – основание натурального логарифма).

Характеристики некоторых металлов приведены в табл. 8.1.

## Характеристики некоторых металлов

Металл	Химический знак	Удельное сопротивление $\rho$ , (Ом · мм <sup>2</sup> )/м	Удельная проводимость $\sigma$ , 1/(Ом · мм)	Эквивалентная глубина проникновения $\delta$ , мм
Алюминий	Al	0,03	$33,3 \cdot 10^4$	$2,75 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Свинец	Pb	0,21	$4,76 \cdot 10^4$	$1,30 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Железо	Fe	0,1 при $\mu = 200\mu_0$	$10 \cdot 10^4$	$0,355 \sqrt{\frac{1}{f}}$
		0,67 при $\mu = 2000\mu_0$	$1,5 \cdot 10^4$	$0,290 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Медь	Cu	0,0175	$57 \cdot 10^4$	$2,10 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Латунь	–	0,075	$13,3 \cdot 10^4$	$4,35 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Цинк	Zn	0,06	$16,7 \cdot 10^4$	$3,90 \sqrt{\frac{1}{f}}$
Олово	Sn	0,12	$8,35 \cdot 10^4$	$4,50 \sqrt{\frac{1}{f}}$

\* Частота  $f$  – в килогерцах.

## 8.2. Экраны во внешнем магнитном поле

### 8.2.1. Экран из двух параллельных пластин

Рассмотрим экран, состоящий из двух параллельных пластин достаточно большого размера. Экранированным пространством будет область, заключенная между этими пластинами. Расстояние между пластинами обозначим  $D$ , а толщину пластин –  $d$ . Края экранных пластин соединены поперечными стенками, и поэтому ток в этих пластинах может протекать вокруг экранированной области. Ориентируем прямолинейные координаты таким образом, чтобы нулевая точка (рис. 8.2), лежала в середине экранированного пространства. Внешнее помехонесущее поле однородно; его напряженность  $H_d$  параллельна поверхности экрана и имеет направление оси  $y$ . Напряженность магнитного поля во всем окружающем пространстве имеет одну  $y$ -компоненту

Все характеристики поля зависят только от координаты  $x$ . Дифференциальное уравнение в частных производных (8.7) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = k^2 H, \quad (8.10)$$

общее решение которого для воздушной среды (при  $\sigma = 0$  и, следовательно,  $k = 0$ ) будет

$$H = c_1 x + c_2,$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные.

Так как напряженность поля нигде не может становиться бесконечно большой, то во внешней области постоянная  $c_1 = 0$ .

При достаточном удалении внешнее поле должно совпадать с однородным полем помех, тогда

$$c_2 = H_0,$$

и для внешнего пространства имеем решение

$$H = H_0 \quad \text{для} \quad |x| \geq \frac{1}{2} D. \quad (8.11)$$

Необходимо определить напряженность поля между пластинами  $H_i$ . Для применения граничных условий следует определить напряженность электрического поля  $E$ , которая в данном случае имеет лишь одну компоненту в направлении оси  $z$ .

Обозначим  $E_z = E$ . Остальные компоненты  $E$  равны нулю.

Рассчитаем  $E$  из уравнения (8.2). Имеем

$$\text{rot}_y E = -\frac{dE}{dx} = -j\omega\mu_0 H.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$E = j\omega\mu_0 H_i x = \frac{\mu_0 k^2}{\mu \sigma} H_i x \quad \text{для} \quad |x| \leq \frac{1}{2} D. \quad (8.12)$$

Постоянная интегрирования в данном случае равна нулю, так как  $E$  – нечетная функция  $|E(x) = -E(-x)|$ . Напряженность магнитного поля  $H$  внутри металлической стенки рассчитаем по уравнению (8.7)

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = k^2 H \quad \text{для} \quad \frac{D}{2} \leq |x| \leq \frac{D}{2} + d. \quad (8.13)$$

Частное решение этого уравнения выражается экспоненциальной функцией  $H = e^{\pm kx}$ . Общее решение имеет вид

$$H = Ae^{kx} + Be^{-kx}, \quad (8.14)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные интегрирования.

Напряженность электрического поля определяют при помощи уравнения (8.1)

$$E = \frac{1}{\sigma} \frac{dH}{dx} = \frac{k}{\sigma} [Ae^{kx} - Be^{-kx}]. \quad (8.15)$$

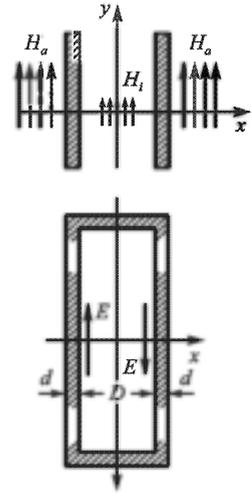


Рис. 8.2. Экран из параллельных пластин

В уравнениях (8.11), (8.12), (8.14) и (8.15) имеются три постоянные:  $H_i$ ,  $A$  и  $B$ , для определения которых нужны три уравнения, которые получим из граничных условий на границе между металлом и воздухом, рассмотренных в п. 8.1. Из трех уравнений вычислим искомое выражение напряженности  $H_i$

$$H_i = \frac{H_a}{\operatorname{ch} d + \frac{1}{2} \operatorname{sh} kd} = \frac{H_a}{\operatorname{ch}(1+j) \frac{d}{\delta} + \frac{\mu_0}{2\mu} \frac{1+j}{\delta} D \operatorname{sh}(1+j) \frac{d}{\delta}}. \quad (8.16)$$

Таким образом, во внутреннем пространстве поле, как и поле помех, оказывается однородным. Действие экрана характеризуется величиной  $S$ , определенной в децибелах и называемой коэффициентом экранирования:

$$S = 20 \lg \frac{H_a}{H_i}.$$

Экранное затухание  $b_Q$  определим согласно Кадену по формуле

$$b_Q = \ln \left| \frac{H_a}{H_i} \right|.$$

Рассчитаем экранное затухание для обеих областей частот (низкие и высокие) по формуле (8.16)

$$b_Q = \ln \left| \frac{H_a}{H_i} \right| \approx \begin{cases} \frac{1}{2} \ln \left[ 1 + \left( \frac{\omega \mu_0 \sigma D d}{2m} \right)^2 \right] & \text{для } d < \delta \text{ (низкие частоты);} \\ \frac{d}{\delta} + \ln \frac{\mu_0}{\mu} \frac{D}{2\sqrt{2}m\delta} & \text{для } d > \delta \text{ (высокие частоты).} \end{cases} \quad (8.17)$$

Из полученных формул следует, что во всех случаях экранное затухание тем больше, чем дальше пластины удалены друг от друга, т.е. чем больше  $D$ . Частотная зависимость экранного затухания представлена на рис. 8.3. Кривые показывают, что  $b_Q$  для  $d > \delta$  резко возрастает.

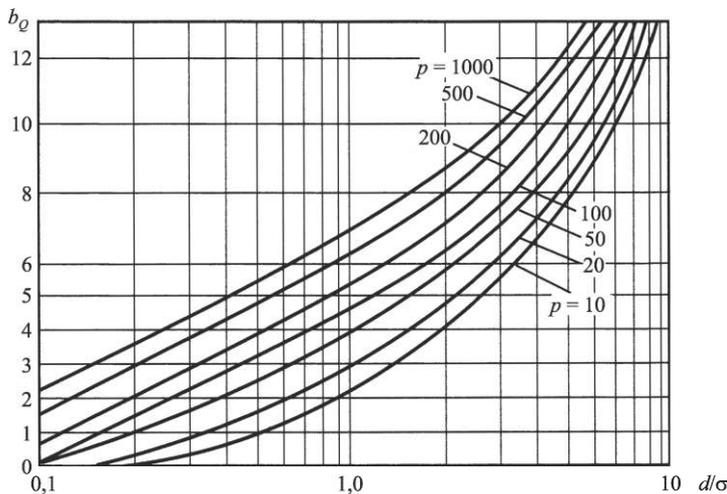


Рис. 8.3. Экранное затухание  $b_Q$  для плоского и цилиндрического экранов ( $P = \frac{\mu_0}{\mu} \frac{D}{d}$  для плоского экрана и  $P = \frac{\mu_0}{\mu} \frac{R}{d}$  для цилиндрического экрана)

В формулу (8.17) введен множитель  $m$ , при помощи которого эти формулы распространяются на цилиндрические и сферические экраны. Для этой цели нужно размер  $D$  заменить диаметром и предположить, что  $m = 2$  для цилиндрического экрана и  $m = 3$  для сферического. Для плоского экрана  $m = 1$ .

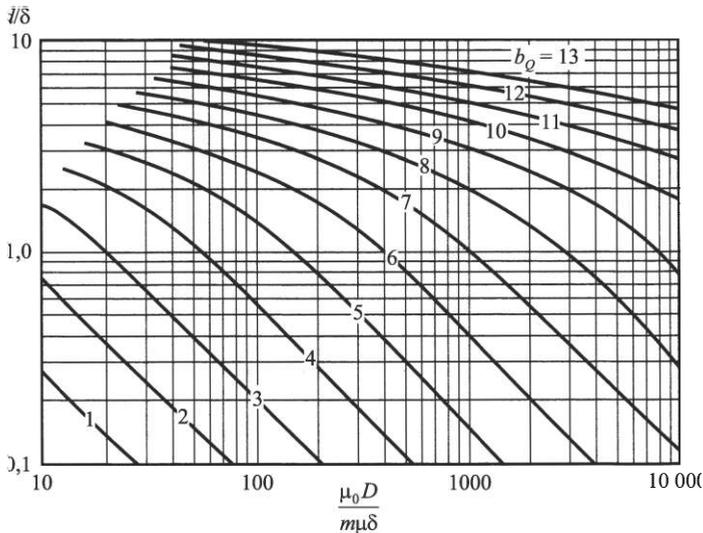
В практических задачах толщину экрана можно определить по формуле, взяв за основу формулу (8.17):

$$d = \begin{cases} \frac{\mu}{\mu_0} \frac{m\delta^2}{D} \sqrt{e^{2b_Q} - 1} = \frac{2m\sqrt{e^{2b_Q} - 1}}{\omega\mu_0\sigma D} & \text{для } d \leq \delta; \\ \delta \left[ b_Q - \ln \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\mu_0}{\mu} \frac{D}{m\delta} \right] & \text{для } d \geq \delta. \end{cases} \quad (8.18)$$

При практических расчетах сначала находят по заданным частоте и удельной проводимости  $\sigma$  эквивалентную глубину проникновения  $\delta$  (уравнение (8.9) и график см. рис. 8.1). Затем в формулу (8.18) подставляют значение  $D$ , и, в зависимости от того, будет ли значение  $d$  больше или меньше  $\delta$ , выбирают для приближенного расчета нижнюю или верхнюю формулу.

При большом экранном затухании ( $b_Q > 1$ ) применяется всегда нижняя формула, соответствующая явлению поверхностного эффекта и  $d > \delta$ .

На рис. 8.4 приведены кривые, при помощи которых можно без подсчетов при заданном экранном затухании получить данные экрана, приняв для плоского экрана  $m = 1$ .



**Рис. 8.4. Определение толщины стенки экранной оболочки для заданного экранного затухания  $b_Q$**

Вследствие того, что направление поля параллельно поверхности экрана, при нулевой частоте получаем коэффициент экранирования 1. То же самое будет иметь место и для железного экрана с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu_0 \ll \mu$ ), т.е. при магнитостатическом экранировании.

### 8.2.2. Цилиндрический экран в продольном поле

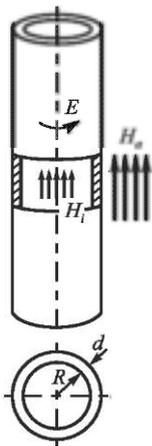


Рис. 8.5. Цилиндрический экран в аксиально направленном поле

Коэффициент экранирования  $S$  цилиндрического экрана можно считать по формуле (8.16), в которую вместо расстояния между пластинами  $D$  подставляют радиус  $R$  экрана (рис. 8.5). Такое использование формулы допустимо, если предположить, что рассматриваемая цилиндрическая оболочка тонкостенная ( $d \ll R$ ). Это предположение является основным для согласования с формулами плоского экрана, потому что при этом можно пренебречь кривизной стенок экрана.

В уравнениях (8.13)–(8.15) следует заменить  $x$  на  $r$  и  $D/2$  на  $R$ . Для внутреннего пространства следует подсчитать напряженность цилиндрического поля  $E$  по (8.12)

$$E = -j\omega\mu_0 H_i \frac{R}{2}$$

для области внутри стенок экрана. Так же в уравнение (8.16) следует подставить  $R$  вместо  $D$ .

Сравним теперь друг с другом два экрана: один – плоский, состоящий из двух пластин с расстоянием  $D$  между ними, и другой – цилиндрический в виде полой трубы диаметром  $D = 2R$  со стенками одинаковой толщины  $d$ . Как указывалось ранее, экранное затухание цилиндрического экрана в  $\ln 2 \approx 0,7$  раза меньше, чем плоского. Физически это обстоятельство объясняется уменьшением магнитного потока, пронизывающего цилиндрический экран, по сравнению с плоским.

Тот факт, что, коэффициенты экранирования  $S$  двух столь различных типов экранов, как цилиндрический и плоский различаются лишь множителем 2, позволяет заключить, что, например, длинный экран с прямоугольным сечением может являться приближением к обоим указанным ранее идеальным типам экранов; если размеры прямоугольного сечения одинаковы, то для расчета могут быть применены формулы цилиндрического экрана, при увеличении же одной из сторон этого сечения – плоского экрана. Таким образом, рассчитываемый коэффициент экранирования может отличаться не больше, чем в 2 раза.

В п. 8.2.4 дан расчет сферического экрана и показано, что он эквивалентен замкнутым экранам, имеющим одинаковую длину по всем трем координатам.

### 8.2.3. Цилиндрический экран в поперечном поле

Введем полярные координаты (рис. 8.6). Разделим пространство на три части: воздушное вне экрана ( $r \geq R$ ), в котором напряженность поля равна  $H_a$ ; экранированное внутреннее ( $r \leq R - d$ ); объем стенок экрана ( $R - d \leq r \leq R$ ). Так как поле имеет компоненты  $H_r$  и  $H_\phi$  по обеим координатам  $r$  и  $\phi$ , то для вычисления этих компонент внутри и вне экрана воспользуемся потенциалом  $U$ , определенным уравнением (8.3).

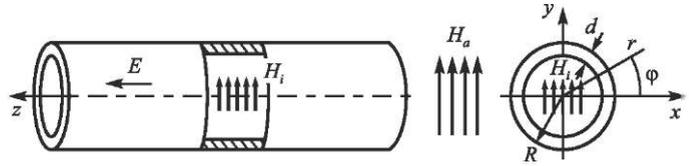
В достаточном удалении от экрана рассчитываемое поле должно переходить в однородное с потенциалом  $U_0$ . По уравнению (8.3) получим

$$\frac{\partial U_0}{\partial y} = H_a = \text{const},$$

откуда

$$U_0 = H_a y = H_a r \sin \varphi. \quad (8.19)$$

Рис. 8.6. Цилиндрический экран в поперечно направленном поле



В соответствии с этим результатом примем для потенциала  $U_0$  выражение

$$U_0 = f(r) \sin \varphi \quad (8.20)$$

и подставим его в дифференциальное уравнение (8.4), которое в полярных координатах имеет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (8.21)$$

Для функции  $f(r)$  получим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка

$$f'' + \frac{1}{r} f' - \frac{1}{r^2} f = 0. \quad (8.22)$$

Учитывая, что  $f = r^n$ , определим оба решения ( $n = \pm 1$ )

$$f = \begin{cases} r; \\ \frac{1}{r}. \end{cases} \quad (8.23)$$

Общее выражение потенциала во внешнем пространстве получится сложением обоих решений (8.23)

$$U_a = H_a \left( r + \frac{R^2}{r} W_1 \right) \sin \varphi \quad \text{для } r \geq R, \quad (8.24)$$

где  $W_1$  – постоянная.

Это решение для больших расстояний  $r \gg R$  асимптотически переходит в выражение (8.19) и содержит пока неопределенную постоянную  $W_1$  в форме удобной для последующих расчетов.

Постоянная  $W_1$  представляет собой комплексное число, которое будем называть коэффициентом обратного действия экрана. При помощи (8.3) можно определить напряженность магнитного поля

$$H_r = \frac{\partial U_a}{\partial r} = H_a \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} W_1 \right) \sin \varphi; \quad (8.25)$$

$$H_\varphi = \frac{\partial U_a}{r \partial \varphi} = H_a \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} W_1 \right) \cos \varphi. \quad (8.26)$$

Так как напряженность поля не может обращаться в бесконечность, то решение для внутренней области должно иметь вид

$$U_i = H_i r \sin \varphi = Q_1 U_0 \quad \text{для } r \leq R - d, \quad (8.27)$$

где и напряженность  $H_i$  и  $Q_1$  – пока еще неизвестные значения.

Компоненты поля определим из уравнения  $\mathbf{H} = \text{grad } U_1$ :

$$H_r = H_i \sin \varphi = Q_1 H_a \sin \varphi; \quad (8.28)$$

$$H_\varphi = H_i \cos \varphi = Q_1 H_a \cos \varphi. \quad (8.29)$$

Рассчитаем напряженность электрического поля в металлической стенке.

Вследствие поперечности магнитного поля напряженность электрического поля будет иметь только одну компоненту по оси  $z$ , которую обозначим  $E_z = E$ . Из уравнения (8.6) получим дифференциальное уравнение для  $E$  в полярных координатах.

Примем условие тонкостенности экранной оболочки ( $d \ll R$ ), в силу которого можно пренебречь изменением  $r$  в толщине металлической стенки. Получим

$$\Delta E = \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} = k^2 E. \quad (8.30)$$

При помощи функции  $f(r) \cos \varphi$  можно найти частное решение этого уравнения:

$$e^{\pm k_1 r},$$

где  $k_1 = \sqrt{k^2 + \frac{1}{R^2}}$ .

Напряженность электрического поля:

$$E = [Ae^{k_1 r} + Be^{-k_1 r}] \cos \varphi \quad \text{для } R - d \leq r \leq R. \quad (8.31)$$

Из уравнений Максвелла (8.2) получаем:

$$j\omega\mu H_r = -\frac{\partial E}{r\partial\varphi} = [Ae^{k_1 r} + Be^{-k_1 r}] \frac{\sin \varphi}{r}; \quad (8.32)$$

$$j\omega\mu H_\varphi = -\frac{\partial E}{\partial r} = k_1 [Ae^{k_1 r} - Be^{-k_1 r}] \cos \varphi. \quad (8.33)$$

Определив постоянные  $W_1, S, A$  и  $B$ , получим выражение

$$Q_1 = \frac{1}{\text{ch } k_1 d + \frac{1}{2} \left( K_1 + \frac{1}{K_1} \right) \text{sh } k_1 d} \quad (8.34)$$

и для постоянной

$$W_1 = \frac{\frac{1}{2} \left( K_1 - \frac{1}{K_1} \right) \text{sh } k_1 d}{\text{ch } k_1 d + \frac{1}{2} \left( K_1 + \frac{1}{K_1} \right) \text{sh } k_1 d} = \frac{1}{2} Q_1 \left( K_1 - \frac{1}{K_1} \right) \text{sh } k_1 d, \quad (8.35)$$

где  $K_1 = \frac{\mu_0}{\mu} k_1 R$ .

Заметим, что обычно  $|k|R \gg 1$ . В противном случае действие экрана будет ничтожно. Поэтому мы можем положить  $k_1 \approx k$  и отбросить индекс 1 у остальных постоянных.

Анализируя выражения (8.34) и (8.35), подчеркнем следующее: внутреннее поле, так же как и внешнее, однородно, имеет то же направление, но с временным сдвигом по фазе, что объясняется действием экрана; при предельном значении частоты, равном нулю, экранное воздействие железных экранов ( $\mu \gg \mu_0$ ) не обращается в нуль, в отличие от случаев, рассмотренных раньше.

Получаем так называемое магнитоэкранирование, обусловленное коротким замыканием магнитного потока в экране.

Чем толще экран и больше магнитная проницаемость  $\mu$ , тем меньше  $H_i/H_a$  и, следовательно, тем сильнее экранный эффект.

При возрастании частоты железный экран будет вести себя как электромагнитный, для которого  $|K| > 1$ . В этом случае исчезает явление короткого замыкания магнитного потока, потому что при высокой частоте, благодаря поверхностному эффекту для тока и магнитного потока, действующее сечение железных стенок экрана оказывается ничтожным (рис. 8.7). Экранное затухание для железного экрана при условии  $|K| \ll 1$  и  $d < \delta$  остается постоянным и начинает расти с возникновением в стенках экрана вихревых токов.

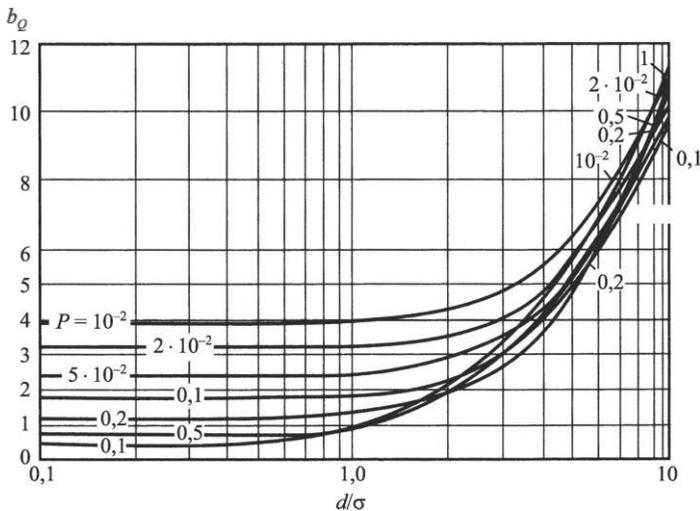


Рис. 8.7. Экранное затухание  $b_0$  железного цилиндрического экрана в поперечном поле

Обычные нежелезные экраны ведут себя, как экраны, рассмотренные в п. 8.2.1 и 8.2.2. Для их расчета применимы формулы (8.17) и (8.18) при  $m = 2$  и замене размера  $D$  диаметром. Можно воспользоваться также кривыми (рис. 8.4) при  $m = 2$ .

В отличие от случаев, рассмотренных раньше, экран оказывает на внешнее поле обратное действие, которое эквивалентно действию диполя, расположенного по оси цилиндра, момент которого пропорционален коэффициенту обратного действия и при возрастании частоты меняется асимптотически от нуля до некоторого предельного значения, а также квадрату радиуса экрана  $R$ .

Как видно из уравнений (8.25) и (8.26), напряженность поля обратного действия убывает пропорционально квадрату расстояния  $r^2$  от экрана.

Представим постоянную  $W$  вектором на комплексной плоскости так, чтобы его аргумент соответствовал временному углу сдвига фаз

$$W = x + jy. \quad (8.36)$$

Тогда для немагнитного экрана ( $\mu = \mu_0$ ) по уравнению (8.35) можно построить круговую диаграмму (рис. 8.8).

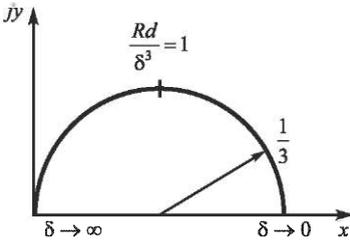


Рис. 8.8. Коэффициент обратного действия  $W = x + jy$  для немагнитных оболочек

Для этого в уравнении (8.35) следует пренебречь значением  $1/K_1$  и положить  $\text{ch } kd \approx 1$  и  $\text{sh } kd \approx kd$ . Круговая диаграмма существует только при условии  $d < \delta$ , т.е. в отсутствие поверхностного эффекта. Предельное значение коэффициента обратного действия равно +1.

В случае магнитоэкранирования при  $|K| \ll 1$  и  $d < \delta$  коэффициент обратного действия имеет противоположный знак и равен  $-1$ . С возрастанием частоты этот коэффициент возрастает и стремится к +1.

Между отношением

$$\frac{H_i}{H_a} = Q$$

и коэффициентом обратного действия  $W$  существует связь:

– слабое экранирование

$$Q \rightarrow 1; \quad W \rightarrow 0;$$

– сильное экранирование

$$Q \rightarrow 0; \quad \begin{array}{l} W \rightarrow +1 \text{ для электромагнитного экранирования;} \\ W \rightarrow -1 \text{ для магнитоэкранирования.} \end{array}$$

#### 8.2.4. Тонкостенный сферический экран

Сферическая оболочка является простейшим типом экрана, все три измерения которого конечны. Теория сферического экрана имеет большое значение, так как часто замкнутые экраны различной формы допускается заменять сферическим экраном так, чтобы три координатных размера заменяемого экрана приближались к диаметру сферического (например, цилиндрический замкнутый экран диаметром поперечного сечения, равным высоте). Эквивалентный сферический экран должен иметь стенки той же толщины и примерно равный объем.

Для расчетов сферических экранов введем сферические координаты  $r, \vartheta, \varphi$  (рис. 8.9). Окружающее пространство разобьем на три области: внешнюю ( $r \geq R$ ), внутреннюю экранированную ( $r \leq R - d$ ) и объем металлических стенок ( $R - d \leq r \leq R$ ). Ориентируем координатную систему так, чтобы ось  $z$  совпадала с направлением помехонесущего поля и начало координат совпадало с центром сферы.

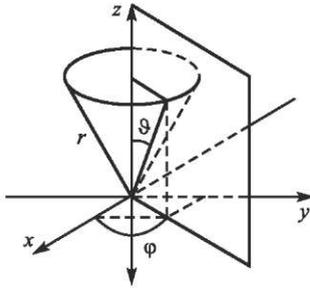


Рис. 8.9. Сферические координаты  $r$ ,  $\vartheta$  и  $\varphi$

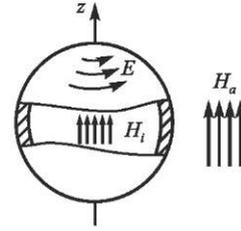


Рис. 8.10. Расположение координатной системы относительно сферической оболочки

Рассчитаем поля напряженности в воздушном пространстве. Потенциал этого поля в соответствии с расположением сферического экрана (рис. 8.10), не зависит от  $\varphi$

$$U_0 = H_a z = H_a r \cos \vartheta. \quad (8.37)$$

Потенциал  $U$  рассчитываемого поля должен удовлетворять дифференциальному уравнению (8.4), причем благодаря осевой симметрии все величины окажутся независимыми от  $\varphi$ . Таким образом, необходимо решить следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \sin \vartheta \frac{\partial U}{\partial \vartheta} \right) = 0. \quad (8.38)$$

Учитывая (8.38), положим

$$U = f(r) \cos \vartheta, \quad (8.39)$$

и после подстановки в уравнение (8.38) и его решения найдем общее выражение  $U_0$  для внешнего пространства.

Это решение при достаточном удалении от экрана ( $r \gg R$ ) должно быть аналогичным решению по формуле (8.37). Выражению  $U_a$  придадим такую же форму, как в формуле (8.24)

$$U_a = H_a \left( r + \frac{R^3}{r^2} W_a \right) \cos \vartheta \quad \text{для } r \geq R, \quad (8.40)$$

где  $W_a$  – коэффициент обратного действия, который должен быть определен.

Индекс  $a$  показывает, что в  $W_a$  учтено обратное действие на внешнее пространство.

Отметим, что коэффициент обратного действия на внутреннее пространство, как будет установлено дальше, отличается от  $W_a$ . Из уравнения (8.3) получим выражения компонент напряженности магнитного поля:

$$H_r = \frac{\partial U_a}{\partial r} H_a \left( 1 - \frac{2R^3}{r^3} W_a \right) \cos \vartheta; \quad (8.41)$$

$$H_\vartheta = \frac{1}{r} \frac{\partial U_a}{\partial \vartheta} = -H_a \left( 1 + \frac{R^3}{r^3} W_a \right) \sin \vartheta. \quad (8.42)$$

Для внутреннего пространства решение при  $r = 0$  не должно обращаться в бесконечность.

Принимая это во внимание, получим

$$U_i = H_i r \cos \vartheta = QU_0 \quad \text{для } r \leq R - d. \quad (8.43)$$

Компоненты поля для этой области определим аналогично

$$H_r = H_i \cos \vartheta = QH_a \cos \vartheta = QH_a \cos \vartheta; \quad (8.44)$$

$$H\vartheta = -H_i \sin \vartheta = -QH_a \sin \vartheta. \quad (8.45)$$

Относительно самих стенок экрана положим, что допустимо пренебрегать изменением радиуса по их толщине.

При таком допущении напряженность электрического поля  $E$  будет иметь только одну поперечно-круговую компоненту в направлении координаты  $\varphi$ , определяющуюся выражением:

$$E = [Ae^{kr} + Be^{-kr}] \sin \vartheta \quad \text{для } R - d \leq r \leq R, \quad (8.46)$$

содержащую две неопределенные постоянные:  $A$  и  $B$ .

Из этого выражения с помощью (8.2) рассчитаем компоненты напряженности магнитного поля

$$j\omega\mu H_r \approx -\frac{1}{R \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (\sin \vartheta E) = -\frac{2}{R} [Ae^{kr} + Be^{-kr}] \cos \vartheta; \quad (8.47)$$

$$j\omega\mu H_\vartheta \approx \frac{\partial E}{\partial r} = k [Ae^{kr} - Be^{-kr}] \sin \vartheta. \quad (8.48)$$

Из граничных условий определим все четыре параметра:  $W_a, Q, A, B$ . Получим выражения

$$Q = \frac{1}{\operatorname{ch} kd + \frac{1}{3} \left( K + \frac{2}{K} \right) \operatorname{sh} kd}; \quad (8.49)$$

$$W_a = \frac{\frac{1}{3} \left( \frac{K}{2} - \frac{2}{K} \right) \operatorname{sh} kd}{\operatorname{ch} kd + \frac{1}{3} \left( K + \frac{2}{K} \right) \operatorname{sh} kd}, \quad (8.50)$$

где

$$K = \frac{\mu_0}{\mu} kR.$$

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

В сферическом экране внутреннее поле также однородно и для расчета достаточно знать  $Q$ . Для магнитоэстатического режима

$$Q = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\mu}{\mu_0} \frac{d}{R}} \quad \text{для } |k|d < 1, |K| \ll 1 \text{ и } \mu \gg \mu_0. \quad (8.51)$$

В этом случае  $Q$  при той же толщине стенок  $d$  и том же размере радиуса  $R$  оказывается несколько меньшим, чем у цилиндрического экрана.

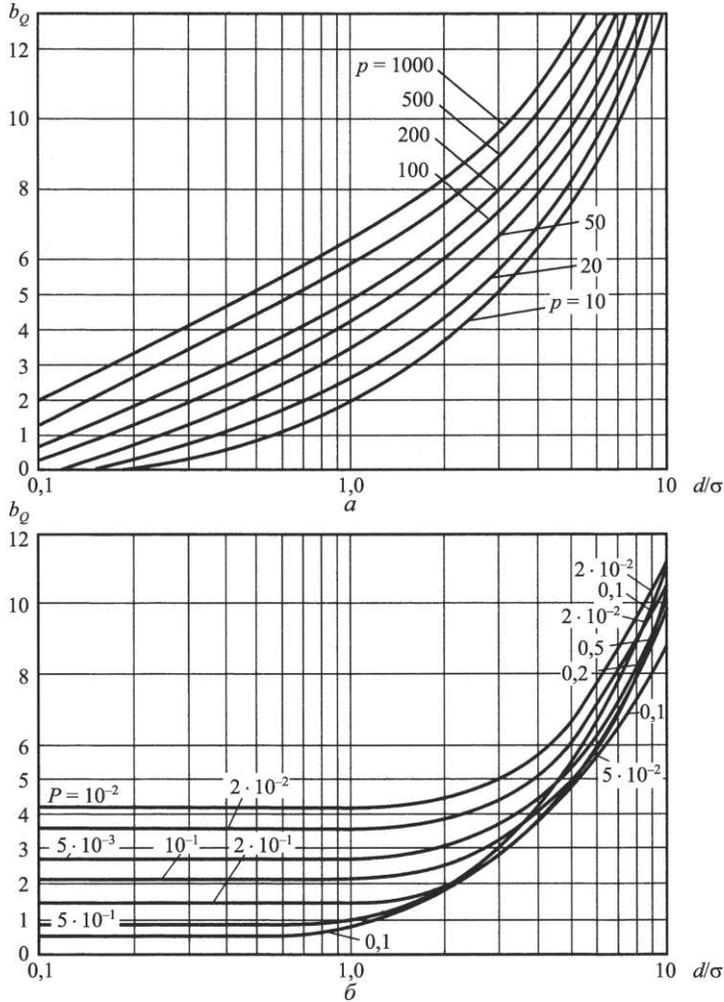


Рис. 8.11. Экранное затухание  $b_Q$  сферического экрана

$$\left(\frac{d}{\delta} P\right)^2 \left(\operatorname{ch} 2\frac{d}{\delta} - \cos 2\frac{d}{\delta}\right):$$

$a$  – для неферромагнитного

$$b_Q = \frac{1}{2} \ln \left\{ \left(\frac{d}{\delta} P\right)^2 \left(\operatorname{ch} 2\frac{d}{\delta} - \cos 2\frac{d}{\delta}\right) + \frac{d}{\delta} P \left(\operatorname{sh} 2\frac{d}{\delta} - \sin 2\frac{d}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \left(\operatorname{ch} 2\frac{d}{\delta} + \cos 2\frac{d}{\delta}\right) \right\};$$

$b$  – для ферромагнитного

$$b_Q = \frac{1}{2} \ln \left\{ \left[ \left(\frac{d}{\delta} P\right)^2 + \left(\frac{1}{3\frac{d}{\delta} P}\right)^2 \right] \left(\operatorname{ch} 2\frac{d}{\delta} - \cos 2\frac{d}{\delta}\right) + \frac{d}{\delta} P \left(\operatorname{sh} 2\frac{d}{\delta} - \sin 2\frac{d}{\delta}\right) + \frac{1}{3\frac{d}{\delta} P} \left(\operatorname{sh} 2\frac{d}{\delta} + \sin 2\frac{d}{\delta}\right) + \frac{1}{2} \left(\operatorname{ch} 2\frac{d}{\delta} + \cos 2\frac{d}{\delta}\right) \right\}$$

При возрастании частоты сферический экран ведет себя так же, как и цилиндрический. Зависимость экранного затухания от частоты приведена на рис. 8.11: кривые на рис. 8.11а очень мало отличаются от кривых на рис. 8.3 и 8.7 для цилиндрического экрана. Интересно сравнить значения  $Q$  плоского, цилиндрического и сферического экранов при равенстве толщины их стенок и радиусов. Оказывается

$$Q_{\text{плоск}} : Q_{\text{цил}} : Q_{\text{сферич}} = 1 : 2 : 3. \quad (8.52)$$

Таким образом, экранирующее действие трех совершенно различных типов экранов не сильно различаются. Отсюда следует, что без большой погрешности можно различные технически применяемые экранные оболочки заменять наиболее подходящим эквивалентным экраном одного из рассмотренных трех типов. При этом существенно, чтобы толщина экранной стенки сохранялась неизменной, так как она связана экспоненциальной зависимостью с характеристиками экранного действия.

Задачу об определении толщины стенки сферического экрана с заданным коэффициентом экранного затухания  $b_Q$  можно решить при помощи кривых (см. рис. 8.4), приняв  $b_Q = 3$ , а также формул (8.17) и (8.18).

Обратное действие сферического экрана на внешнее поле эквивалентно действию диполя, помещенного в центр сферы, момент которого пропорционален  $W_a$  и растет пропорционально кубу удаления ( $r$ ) от экрана. Коэффициент обратного действия  $W_a$  у немагнитных экранов очерчивает на комплексной плоскости окружность, как и у цилиндрических, только радиус этой окружности равен  $1/4$ . Для магнитоэлектрического экранирования коэффициент  $W_a$  стремится к  $-1$ .

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Проанализируйте уравнение Максвелла для анализа экранирующего действия электромагнитных экранов.
2. Что такое эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля?
3. Каким логарифмическим выражением описывается действие экрана?
4. Опишите экранное затухание по Кадену.
5. От каких показателей зависит экранный эффект?
6. Назовите особенности экрана из двух параллельных пластин?
7. Какие особенности характеристик цилиндрического экрана в продольном поле вы знаете?
8. Назовите особенности характеристик цилиндрического экрана в поперечном поле?
9. Какими свойствами обладает тонкостенный сферический экран?
10. Как соотносятся затухание магнитного поля для плоского, цилиндрического и сферического экранов при равенстве толщин их стенок и радиусов?

## МОЛНИЯ И МОЛНИЕЗАЩИТА

### 9.1. Общая характеристика грозовой деятельности

Молния – гигантский электрический разряд в атмосфере. Молния возникает в результате накопления электрических зарядов в грозовом облаке. Она сопровождается ярким свечением причудливо искривленного канала, ударной волной, распространяющейся в окружающем канале воздухе, переходящей на некотором расстоянии от канала в звуковую. Акустическое проявление молнии называют громом.

Молния представляет собой грозное природное явление, приносящее ущерб человеку и его имуществу. Этот ущерб связан с непосредственным поражением людей и животных, пожарами в жилых и производственных помещениях, взрывами опасных объектов, с возникновением лесных пожаров, с генерированием мощного электромагнитного импульса и т.д. Электромагнитный импульс молнии создает проблемы электромагнитной совместимости.

На Земле одновременно существуют примерно 2000–3000 грозовых очагов и каждую секунду ее поверхность поражают 100–200 ударов.

По поверхности земного шара грозы распределяются неравномерно. Частота их образования зависит от широты местности, времени года, времени суток, климатических условий, рельефа местности. Над сушей гроз примерно в 10 раз больше, чем над океанами. В прибрежных и предгорных районах часто наблюдается повышенная грозовая активность. В вечерние и ночные часы гроз больше, чем днем. В средних широтах северного полушария грозы в основном бывают в период с мая по сентябрь. Этот период называют грозным сезоном. Зимой грозы возникают сравнительно редко.

Доля разрядов типа «облако-земля»  $z_{o-3}$  в общем количестве разрядов молнии в данной местности, находящейся на географической широте  $\lambda$ , может быть оценена по следующей эмпирической формуле:

$$z_{o-3} = \frac{N_3}{N_o + N_3} = 0,1 + 0,35 \sin \lambda, \quad (9.1)$$

где  $N_3$  – количество разрядов молнии в землю;  $N_o$  – количество облачных молний.

В средних широтах землю поражают 30–40 % общего числа молний, остальные 60–70 % составляют разряды между облаками или между разноименно заряженными частями облаков. В экваториальных широтах изотерма 0 °С располагается выше, чем в средних широтах. Соответственно выше и области концентрации зарядов в облаках, поэтому разряды в землю составляют еще меньшую часть.

Интенсивность грозовой деятельности в какой-либо местности характеризуется средним числом грозовых часов в году  $D_r$ . Число грозовых часов минимально в высоких широтах и постепенно увеличивается к экватору, где повышенная влажность воздуха и высокая температура, способствующие образованию грозовых облаков, наблюдаются практически в течение всего года. В некоторых районах (Армения, Краснодарский край, Донбасс, Карпаты) годовое число грозовых часов достигает 100 и более.

В ряде стран пользуются другой, менее удобной характеристикой грозовой деятельности: годовым числом грозовых дней  $N_r$  (а не часов). По данным Всемирной метеорологической организации в Центральной Африке наблюдается до 180 грозовых дней в году, в Малайзии, Перу, на Мадагаскаре до 140 дней, в Бразилии, Центральной Америке – 100–120 дней.

Для практических задач молниезащиты наземных сооружений важна удельная плотность ударов молнии в землю  $n_{уд}$ , т.е. годовое число ударов в 1 км<sup>2</sup> земной поверхности. В пределах годовой продолжительности гроз до  $D_r = 100$  ч удельная плотность ударов молнии в землю практически прямо пропорциональна  $D_r$ . Это дало возможность принять в России наряду с удельной плотностью ударов молнии другую характеристику грозовой деятельности: среднее число ударов молнии  $n \approx 6,7$  в 1 км<sup>2</sup> поверхности земли за 100 грозовых часов.

Для равнинных районов в российских нормативах рекомендуется применять для расчета плотности ударов молнии в землю следующее соотношение:

$$n_{уд} = 0,05 D_r. \quad (9.2)$$

СИГРЭ для этого случая рекомендует следующее соотношение:

$$n_{уд} = 0,054 D_r^{1,1}. \quad (9.3)$$

Если интенсивность грозовой деятельности выражена годовым числом грозовых дней  $N_r$ , то удельная плотность разрядов  $n_{уд}$  в квадратный километр поверхности за число  $N_r$  грозовых часов в году можно оценить по рис. 9.1. Однако следует иметь в виду, что при одном и том же значении  $N_r$  удельная плотность ударов молнии в землю подвержена значительным разбросам вследствие влияния рельефа местности и климатических условий.

Для территории нашей страны  $D_r = (1,5-2,3)N_r$ , чем больше число грозовых дней в году, тем продолжительнее грозы. Из этого следует, что зависимость  $n_{уд} = f(N_r)$  нелинейна, и поэтому нельзя характеризовать грозовую деятельность просто числом ударов молнии в 1 км<sup>2</sup> поверхности земли за 100 грозовых часов.

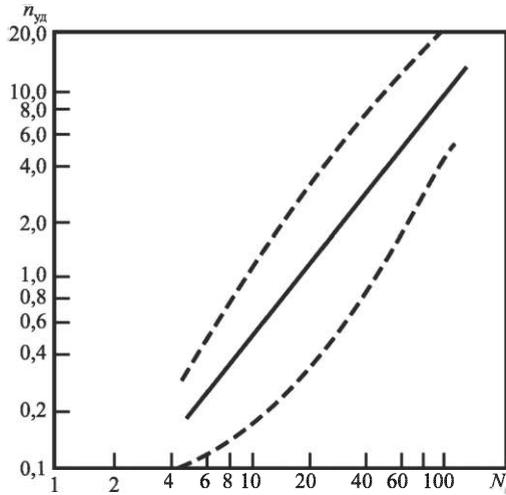
Возвышающиеся над поверхностью земли объекты вследствие развития с них встречных лидеров собирают удары молнии с площади, превышающей занимаемую ими территорию. Однако, приняв  $n = 6,7$ , можно оценить число ударов молнии за 100 грозовых часов в сооружение длиной  $A$ , шириной  $B$  и высотой  $H$  (размеры в метрах) по формуле:

$$n_{уд} = 6,7(A + 6H)(B + 6H) \cdot 10^{-6}. \quad (9.4)$$

Число ударов молнии в 100 км воздушной линии электропередачи за 100 грозовых часов:

$$n_{уд} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{cp} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{cp}, \quad (9.5)$$

где  $h_{cp} = \left( h_{оп} - \frac{2}{3} f \right)$  – средняя высота подвеса троса или, при отсутствии тросов, верхнего провода, м;  $h_{оп}$  – высота опоры или верхней траверсы, м;  $f$  – стрела провеса троса или провода, м.



**Рис. 9.1.** Зависимость удельного числа  $n_{уд}$  ударов молнии в  $1 \text{ км}^2$  площади Земли от числа  $N_g$  грозовых дней в году (штриховыми линиями ограничена область разбросов по данным наблюдений)

Годовое число ударов молнии в линию длиной  $L$ , км, при числе грозовых часов в году  $D_g$ , час/год, определяется как

$$n_g = n_{уд} \frac{L}{100} \frac{D_g}{100}. \quad (9.6)$$

## 9.2. Грозовые облака и их характеристики

Облаками называются скопления мелких водяных капель или кристаллов льда в атмосфере. В общем случае облака различают по высоте расположения, внешнему виду, фазовому составу, процессам образования. По процессам, порождающим образование облаков, различают облака: фронтальные (перистые и слоистые), турбулентного перемешивания (слоистые), ячейковой циркуляции (перисто-кучевые и слоисто-кучевые), вертикального развития (кучево-дождевые).

Грозовые облака (кучево-дождевые) простираются по высоте до 15 км, а их основание находится на высоте 0,3–3,5 км. Грозовое облако представляет собой громадную «вытяжную трубу», в которой потоку воздуха по мере его подъема непрерывно сообщается дополнительное тепло, поэтому в зоне облака он всегда теплее, чем вне его. По мере вертикального восхождения потока воздуха в нем происходит конденсация водяных паров, при которой выделяется тепло, затем происходит замерзание капель, также сопровождающееся нагревом окружающего воздуха.

В верхней своей части грозовое облако может состоять из снежинок, кристаллов льда, ледяной или снежной крупы, градин. Нижняя часть, находящаяся при температуре выше  $0^\circ\text{C}$ , состоит обычно из крупных капель воды и поэтому выглядит очень темной.

Площадь основания грозовых облаков, образующихся в летнее время в результате нагрева земной поверхности (тепловые грозы), составляет несколько квадратных километров. Если грозовые облака возникают на границе раздела теплых и холодных

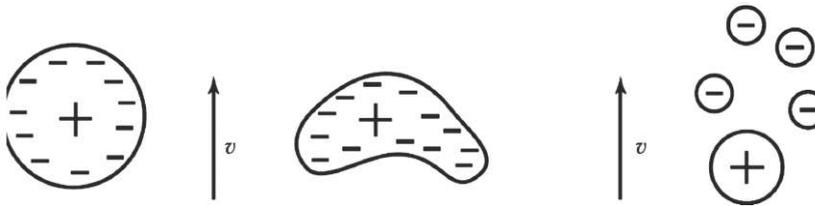
воздушных масс (фронтальные грозы), то занимаемая ими площадь составляет полосу шириной до 15 км и длиной в десятки и даже сотни километров.

Громадная масса воды и льда удерживается в грозовом облаке восходящими воздушными потоками, скорость которых составляет 5–30 м/с. Эти потоки увлекают нагретый у поверхности земли воздух и тем самым снабжают грозовое облако тепловой энергией, часть из которой затем преобразуется в электрическую энергию. Таким образом, фазе молнии предшествует процесс электризации частиц воды и льда, разделения и накопления электрических зарядов в грозовом облаке.

Имеется множество теорий электризации капель воды и кристаллов льда в грозовых облаках, в большинстве своем нашедших подтверждение в лабораторных исследованиях. В грозовом облаке могут действовать несколько механизмов электризации в зависимости от стадии развития облака и агрегатного состояния воды в нем.

Рассмотрим два механизма характерных для нижней части грозового облака при температуре выше 0 °С и для частей облака, расположенных выше нулевой изотермы.

В основу механизма электризации, действующего при положительной температуре, положено дробление крупных дождевых капель в восходящем потоке воздуха. На границе капли воды и окружающего ее воздуха образуется так называемый двойной электрический слой, при этом поверхность капли имеет отрицательный заряд (рис. 9.2). В восходящем воздушном потоке (при скоростях  $v \sim 7$  м/с и более) водяная капля расплющивается, теряет устойчивость и дробится. Мелкая водяная пыль, формирующаяся из поверхностных слоев капли, оказывается отрицательно заряженной и уносится вверх. Крупные элементы капли остаются в нижней части облака и несут на себе положительный заряд.



**Рис. 9.2.** Процесс разделения зарядов в облаке при положительных температурах воздуха

Механизм электризации при отрицательных температурах связан с процессом замерзания капель воды. Замерзание начинается с поверхности капли, которая покрывается коркой льда (рис. 9.3). Выделяющееся при этом тепло поддерживает температуру внутри капли около 0 °С. Под действием разности температур между сердцевиной капли и ее поверхностью происходит диффузия ионов. Положительные ионы водорода  $H^+$  обладают большей подвижностью, чем ионы  $OH^-$ , поэтому поверхностный слой капли заряжается положительно, в то время как сердцевина капли получает избыточный отрицательный заряд. Когда замерзает сердцевина капли, то вследствие ее расширения ранее замерзший поверхностный слой лопается и его положительно заряженные осколки уносятся потоком воздуха в верхние части облака.

Еще одним механизмом электризации является электризация при разбрызгивании и намерзании переохлажденных капель на градинах. Разрушение капель и электризация происходят, если скорость столкновения превышает некоторое пороговое значения

(для капель воды минимальная кинетическая энергия порядка 10–30 нДж). Знак заряда градин зависит от состава примесей. Например, при разбрызгивании переохлажденных капель чистой воды градины заряжаются положительно.

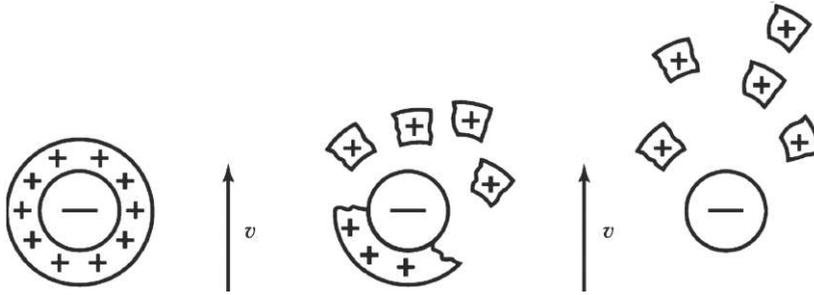


Рис. 9.3. Процесс разделения зарядов в облаке при отрицательных температурах

Еще один механизм электризации в облаках связан со столкновением и отскоком кристаллов льда от крупных ледяных частиц (градин). Заряд в этом случае пропорционален разности работ выхода контактирующих тел (это зависит от примесей и от того, мокрые или сухие градины).

Сейчас считается, что наиболее вероятная структура распределения заряда в облаке включает в себя основной положительный заряд в верхней части, основной отрицательный заряд, располагающийся ниже, и дополнительный положительный заряд в самой нижней части облака. Поэтому в качестве наиболее типичной обобщенной модели грозового облака обычно используют вертикально расположенные точечные заряды или сферические заряженные объемы, изображенные на рис. 9.4.

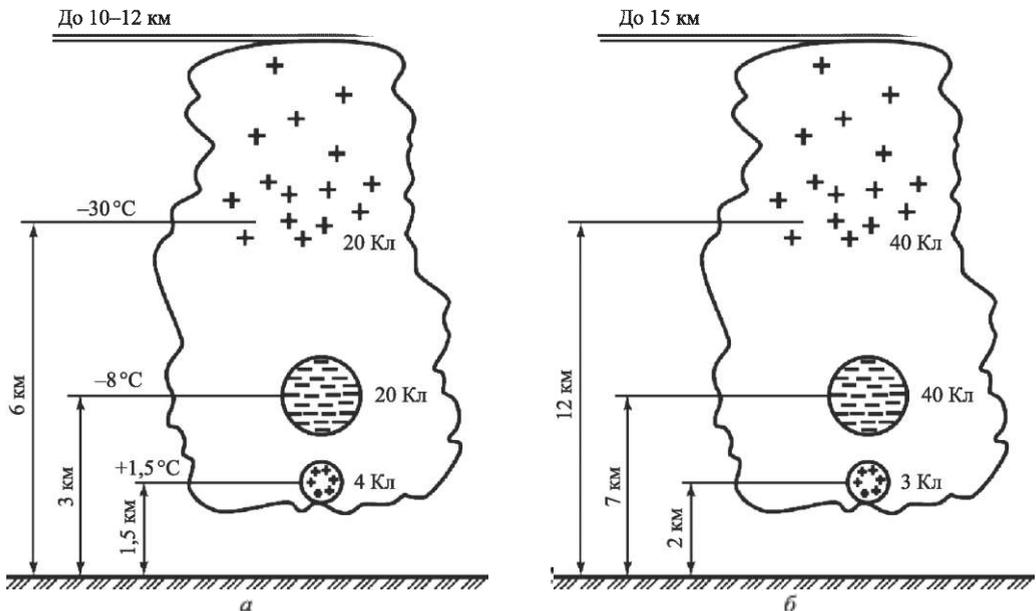


Рис. 9.4. Модель грозового облака:

*а* – для умеренных широт, *б* – для тропических широт

Для умеренных широт средние значения основных зарядов грозового облака составляют 20–25 Кл при расстоянии между ними 2–3 км; для тропических широт эти показатели равны соответственно 35–40 Кл и 5–6 км. Уровни расположения зарядов близки к наблюдаемым, а значения зарядов соответствуют средним значениям напряженности электрического поля, измеряемому у поверхности земли. Сравнительно небольшой положительный заряд в нижней части облака переносится каплями дождя на землю. Предполагается также, что он может способствовать развитию т.н. предварительного пробоя из отрицательно заряженной области.

Грозовое облако по структуре основных зарядов представляет собой диполь. Средний электрический момент, нейтрализуемый при разряде, составляет около 100 Кл·км, а максимальный ~ 500 Кл·км. Частота разрядов при умеренных грозах ~ около одного в 1 минуту, а при интенсивных может достигать 5–10 в минуту. Средняя плотность зарядов в облаке  $3 \cdot 10^{-9}$ – $3 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>, а скорость их накопления  $3 \cdot 10^{-10}$ – $3 \cdot 10^{-8}$  Кл/(м<sup>3</sup>·с). Средняя продолжительность электрической активности отдельного грозового облака 30–40 минут.

### 9.3. Возникновение и развитие молнии

Большинство ударов молнии (80–90 %) развиваются из отрицательно заряженных областей грозового облака и переносят на землю отрицательный заряд. По мере концентрации отрицательных зарядов в облаке увеличивается напряженность электрического поля, и когда она достигает критического значения, зависящего от высоты над землей, становится возможной ионизация воздуха и в сторону земли начинает развиваться разряд. На начальной стадии, называемой лидерной, канал разряда развивается ступенчато. Ступени следуют друг за другом с интервалами 30–50 мкс. Во время каждой ступени канал удлиняется на 5–100 метров. Новая часть разрядного канала светится очень ярко, в то время как старая часть вспыхивает сравнительно тускло (рис. 9.5). Лидерный процесс развивается со средней скоростью  $(1-2) \cdot 10^5$  м/с и продолжается (в видимой с земли части) 10–30 мс.

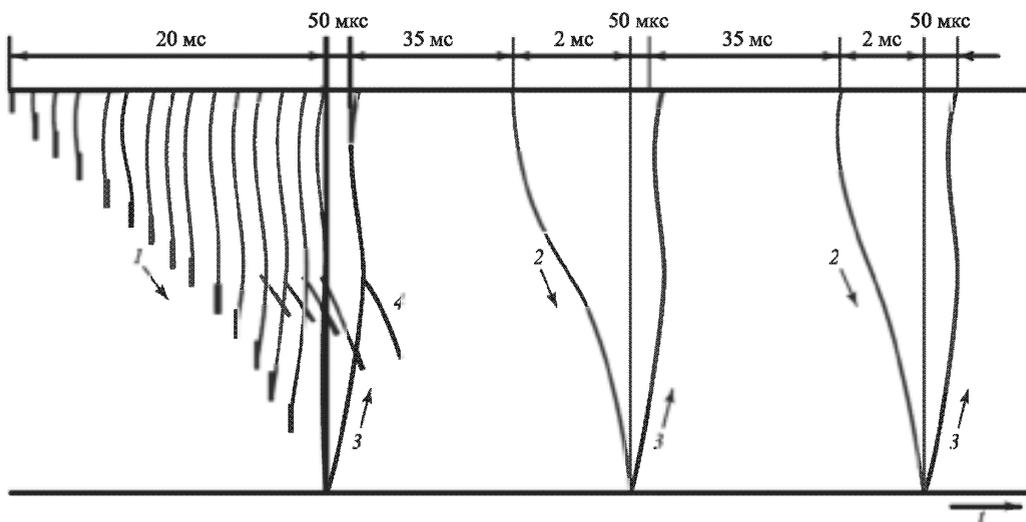


Рис. 9.5. Схема развития трехударной нисходящей молнии:

1 – ступенчатый лидер; 2 – стреловидный лидер; 3 – главный разряд; 4 – ветвь

Канал лидера окружен обширной зоной ионизации, имеющей избыточный заряд того же знака, что и грозовая ячейка в облаке, из которой он развивается. Радиус зоны ионизации можно оценить в первом приближении по формуле

$$r_{\text{зи}} = \frac{\sigma_{\text{л}}}{2\pi\epsilon_0 E_{\text{ср}}}, \quad (9.7)$$

где  $E_{\text{ср}}$  – средняя напряженность электрического поля в стримерной зоне лидера (меньше критической напряженности и может быть в диапазоне (8–16)  $\delta$  кВ/см);  $\delta$  – относительная плотность воздуха;  $\sigma_{\text{л}}$  – линейная плотность заряда (зависит от лидерного тока  $i_{\text{л}}$  и средней скорости развития лидера  $v_{\text{л}}$  и может быть оценена как  $i_{\text{л}}/v_{\text{л}}$ ).

Ток в лидерной стадии молнии имеет порядок десятков и сотен ампер, а радиус зоны ионизации может достигать десятков метров.

Заряды грозового облака и лидера индуктируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака. По мере приближения лидера к земле индуктированный заряд и напряженность электрического поля на вершинах объектов, возвышающихся над поверхностью земли, вырастают, и с них могут начать развиваться встречные лидеры.

Инициирование восходящего перехватывающего лидера с земли (объекта) навстречу спускающемуся ступенчатому лидеру означает начало процесса прикрепления (привязки) к конкретной точке на поверхности земли (объекте).

Когда канал развивающегося от облака лидера приближается к земле или к одному из встречных лидеров на расстоянии 25–100 м, то между ними возникает высокая напряженность электрического поля, среднее значение которой оценивается в 10 кВ/см. Промежуток между лидерами пробивается за несколько микросекунд, и в нем выделяется энергия 0,5–5 МДж, которая расходуется на нагрев и термоионизацию. Проводимость этой части канала разряда резко возрастает. Область высокой напряженности поля, образовавшаяся на границе контактирующего с землей хорошо проводящего канала и зоны ионизации лидера, перемещается по направлению к облаку со скоростью от  $1,5 \cdot 10^7$  до  $1,5 \cdot 10^8$  м/с (0,05–0,5 скорости света). При этом происходит нейтрализация зарядов лидера. Ток в канале за 5–10 мкс достигает многих десятков килоампер, а затем за время 25–200 мкс спадает до половины максимального значения. Процесс этот, называемый главным разрядом, сопровождается сильным свечением канала разряда и электромагнитным излучением. Канал разряда, разогретый за очень короткое время до температуры 20 000–30 000 К, быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, вырождающейся в звуковую и воспринимаемой как гром.

В завершающей (финальной) стадии молнии по каналу в течение десятков миллисекунд проходит ток порядка десятков и сотен ампер. В это время нейтрализуются заряды облака.

В грозовом облаке во многих случаях образуется не одна область концентрации зарядов, а несколько. Располагаются они, как показывает анализ изменения электрического поля во время удара молнии, группами в слоях, в основном на разной высоте. Поэтому развитие разряда из нижней заряженной области по другим направлениям, кроме земли, затруднено. Только после нейтрализации заряда грозовых ячеек нижней области становится возможным разряд из следующей по высоте группы концентрации зарядов (рис. 9.6).

Лидер повторного разряда развивается по ионизированному пути, проложенному первым разрядом, обычно игнорируя ветви первого удара, поэтому скорость его выше и имеет порядок  $10^6$  м/с. Развивается он непрерывно, без ступеней. Ярко светится только его головка, прочерчивая на фоторазвертке во времени непрерывную линию (см. рис. 9.5). Особенности развития лидера повторных разрядов дали основание называть его стреловидным.

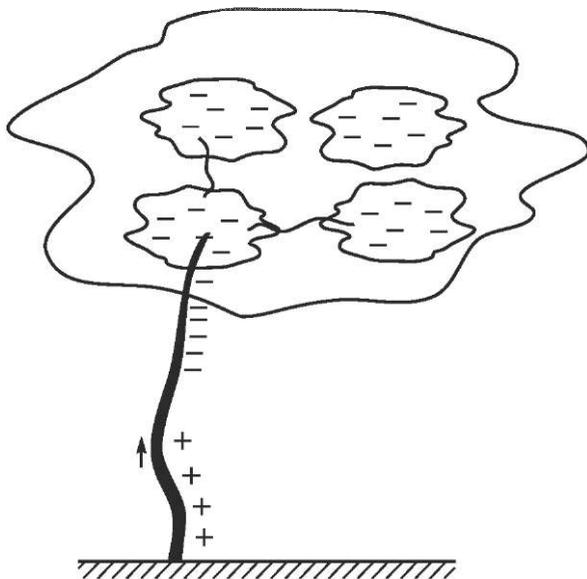


Рис. 9.6. Схема развития многокомпонентной молнии

По достижении стреловидным лидером наземного объекта или встречного лидера происходит повторный плавный разряд, сопровождающийся прохождением по каналу большого тока и ярким его свечением.

В большинстве случаев молния состоит из двух-пяти отдельных разрядов (компонентов), однако наблюдаются молнии и с большим числом компонентов (до 20–30). На рис. 9.7 показаны вероятности возникновения молний с разным числом компонентов. Многокомпонентная молния может длиться до 1,3 с (самое большое зарегистрированное время). Чаще же всего длительность молнии не превышает 0,1 с. Следующие друг за другом яркие вспышки канала при повторных импульсах тока воспринимаются наблюдателем как мерцание молнии.

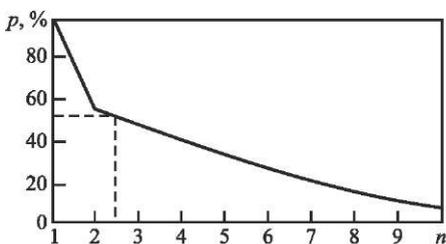


Рис. 9.7. Распределение числа компонентов в ударе молнии

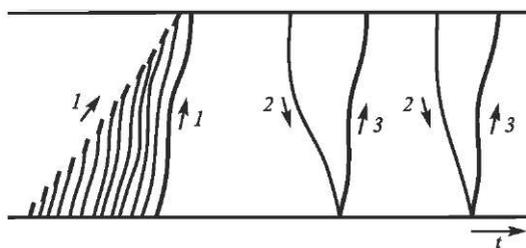


Рис. 9.8. Схема развития восходящей молнии (обозначения на рис. 9.5)

Если высота объекта составляет сотни метров, то напряженность электрического поля на его вершине может достигнуть критического значения раньше, чем напряженность поля в облаке. В таких случаях развитие молнии начинается не с облака, а с вершины объекта. Большинство разрядов, поражающих Останкинскую телебашню, начинается развитием восходящего лидера с ее вершины (540 м над поверхностью земли).

Такие молнии не имеют резко выраженной главной стадии. Лидеры повторных разрядов в этих случаях всегда развиваются от облака к земле, и повторные компоненты не отличаются от нисходящих от облака молний (рис. 9.8).

#### 9.4. Виды молний и параметры тока

Разряды молнии, которые имеют место между облаком и землей (разряды молнии типа «облако–земля»), классифицируются, основываясь на:

- полярности заряда, эффективно переносимого к земле;
- на направлении развития первоначального лидера.

Молнии могут быть отрицательными (их большинство) или положительными в зависимости от знака заряда облака, переносимого к земле. Из самой структуры грозового облака (см. рис. 9.4) следует, что в некоторых случаях они могут быть биполярными, например в начальной части на землю проходит отрицательный ток (переносятся отрицательные заряды), а потом его полярность меняется на положительную.

В зависимости от направления развития лидера – от облака к земле или наоборот – молнии разделяются на нисходящие (направленные вниз) и на восходящие (направленные вверх). Последние наблюдаются при поражениях высоких объектов и в горах. Вероятность возникновения восходящих молний возрастает с увеличением высоты объекта. При поражениях конструкций высотой около 100 м только в 10 % случаев молнии бывают направленными вверх, в то время как при высоте конструкции более 400 м восходящие молнии составляют 95 %.

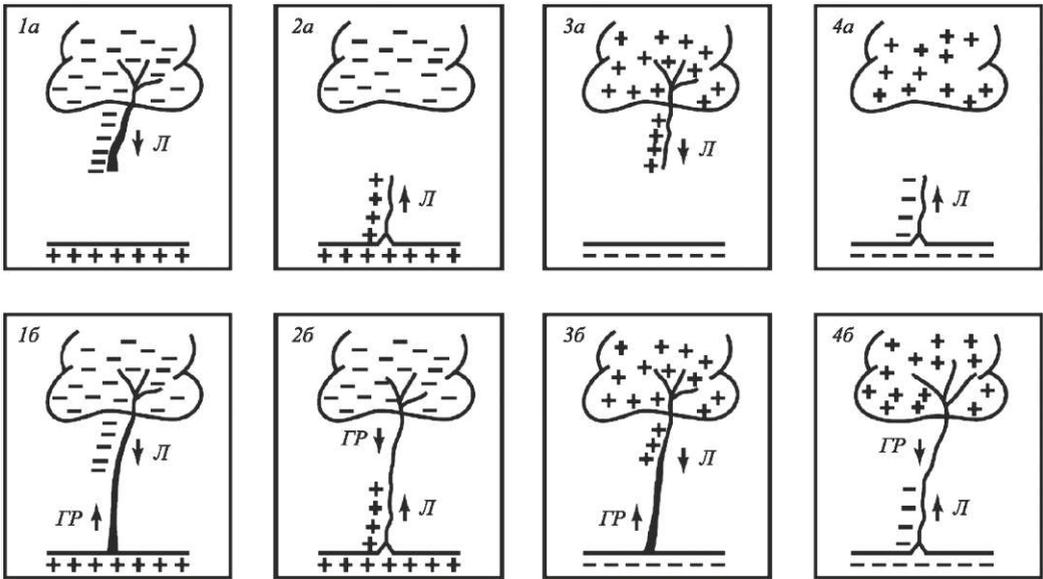
Наряду с завершенными разрядами, образующими канал облако-земля, могут быть и незавершенные разряды. В последнем случае лидерный канал прекращает свое развитие, не доходя до противоположного электрода – земли или облака. Причиной этому могут быть быстро меняющиеся условия в недостаточно зрелом грозовом облаке.

Классификация молний по К. Бергеру (1977 г.) показана на рис. 9.9. Для большинства наземных сооружений характерны типы молний *1б* и *3б*.

Токи молнии являются причиной повышения потенциалов в точке удара и на металлических конструкциях, электрически связанных с этой точкой, а также на контуре заземлителя. Возникают высокие напряжения и на участках электрических контуров, по которым протекает ток молнии или его часть. Значения повышенного потенциала и возникающих высоких напряжений прямо пропорциональны активному сопротивлению и индуктивности контура растекания тока молнии.

В точке удара возникает мощный тепловой поток. Он определяется током и падением напряжения в приэлектродной области, которое практически не меняется во времени и не зависит от тока. Поэтому тепловой поток, поступающий в металл в точке удара, прямо пропорционален протекающему заряду.

Нагрев металлических элементов, по которым протекает ток молнии, определяется произведением активного сопротивления и так называемой удельной энергии тока молнии, представляющей интеграл квадрата тока по времени.



**Рис. 9.9. Классификация молний по К. Бергеру:**

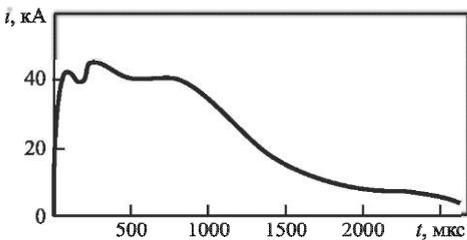
Л – направление развития лидера;

ГР – направление развития главного разряда

Таким образом, при молниезащите необходимо считаться со следующими параметрами тока молнии:

- максимальное значение тока молнии  $I_m$  и изменение тока во времени;
- наибольшая крутизна тока  $a = di/dt$ ;
- заряд, переносимый током  $Q = \int i dt$ ;
- удельная энергия  $A = \int i^2 dt$ .

Ток молнии сложным образом меняется во времени. При положительной полярности заряда облака (примерно 10 % от общего количества грозовых разрядов) он представляет собой однократный униполярный импульс и последующую за ним, так называемую постоянную составляющую тока молнии. На рис. 9.10 показана типичная осциллограмма тока главного разряда положительной молнии.



**Рис. 9.10. Типичная осциллограмма тока молнии, развивающейся с положительно заряженного облака**

При отрицательном заряде облака (примерно 90 % молний) ток молнии состоит из серии импульсов, наложенных на постоянную составляющую тока молнии (рис. 9.11). Импульс тока, следующий за первым, имеет наименьшую длительность импульса, хотя его максимальное значение в несколько раз меньше, чем первого импульса (рис. 9.12).

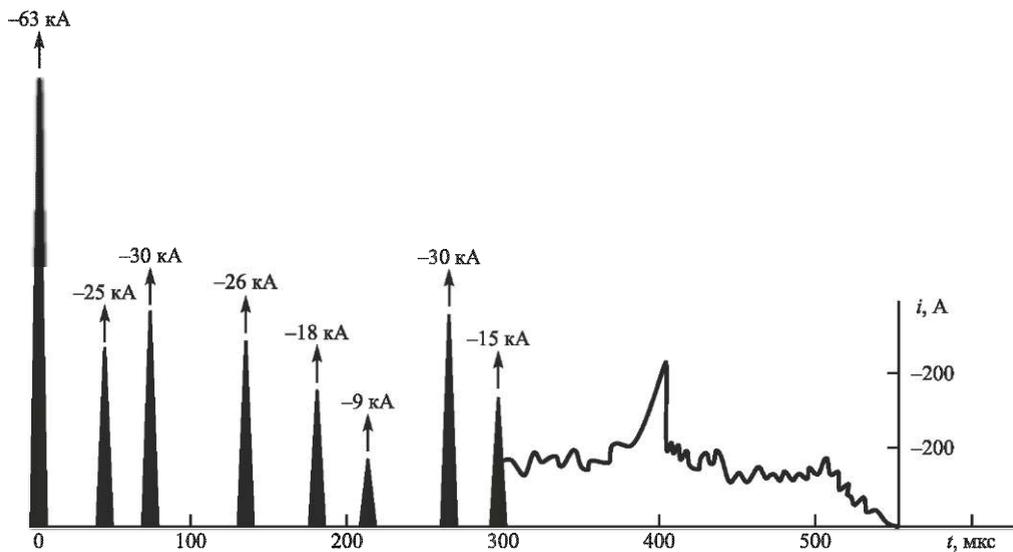


Рис. 9.11. Осциллограмма тока молнии, развивающейся с отрицательно заряженного облака

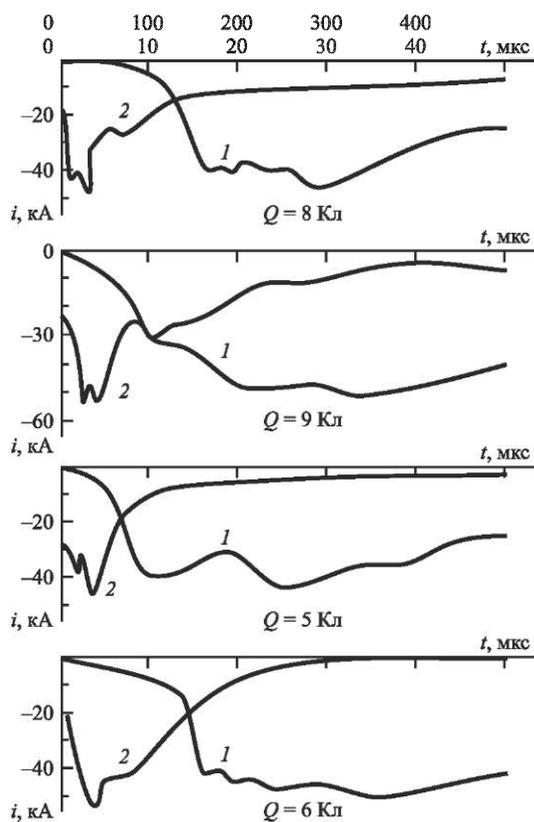
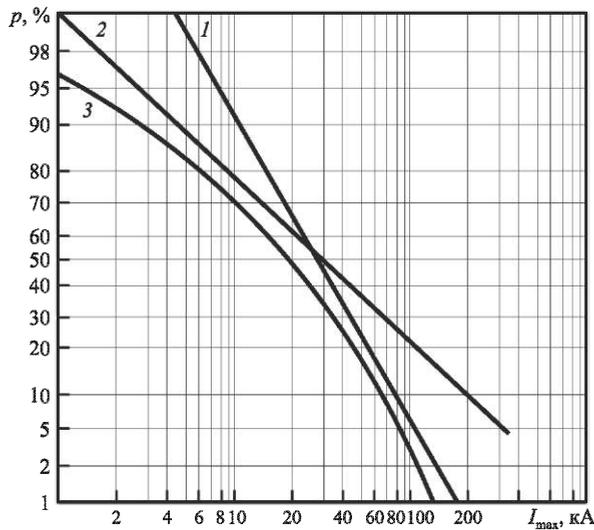


Рис. 9.12. Типичные осциллограммы токов главных разрядов отрицательных молний:  
 1 – нижняя шкала времени; 2 – верхняя шкала времени

Таким образом, молнии каждого типа характеризуются специфическим изменением тока во времени. При решении задач молниезащиты и обеспечения молниестойчивости объектов часто бывает достаточным знать указанные выше основные опасные параметры тока молнии. Важнейшим из них является максимальное значение тока. Наибольшие по значению токи в объектах, расположенных на земле, при отрицательном заряде облака наблюдаются при нисходящих молниях, причем это токи первых главных разрядов.

Статистические данные о значениях токов главных разрядов приведены на рис. 9.13, где по оси ординат отложена вероятность  $p$  того, что амплитуда тока равна заданному значению  $I_m$  или превышает его. Зависимость 3 на рисунке получена по формуле ( $I_m$  – в кА):

$$p_I = \exp\left(-\frac{I_m}{60}\right). \quad (9.8)$$



**Рис. 9.13.** Статистические данные о максимальных значениях токов молнии:

1 – измерения К. Бергера; 2 – измерения Е. Гарбагнатти; 3 – расчет по (9.8)

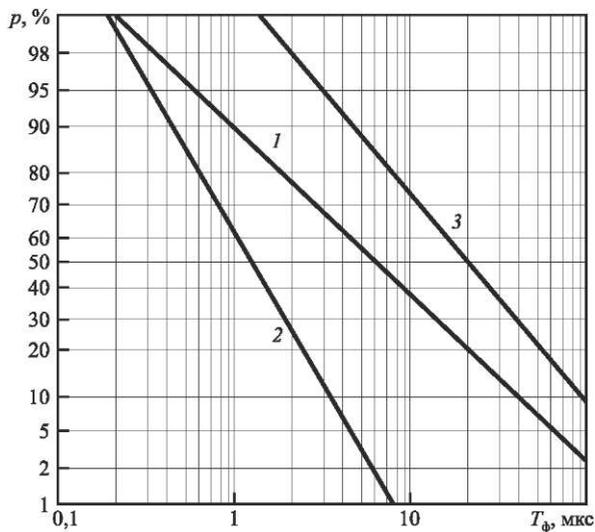
Эта зависимость выражает нормированное в нашей стране распределение вероятностей значений токов молнии. Распределение (9.8) сильно отличается от распределений максимальных значений измеренных токов молнии. Это объясняется тем, что распределение (9.8) учитывает не только максимальные токи нисходящих молний, но и все другие, в том числе токи восходящих молний, а также случаи, связанные с протеканием токов при перекрытиях изоляции линий электропередачи в результате ударов молнии; при этом ток, определяемый магниторегистратором, не обязательно равен току молнии.

При определении поражающего действия тока молнии важно знать не только максимальное значение импульса тока, но и его временные параметры: длительности фронта и импульса.

Распределение вероятностей длительностей фронта  $T_\phi$  приведено на рис. 9.14. Как видно из этого рисунка, длительность фронта импульсов тока повторных вспышек

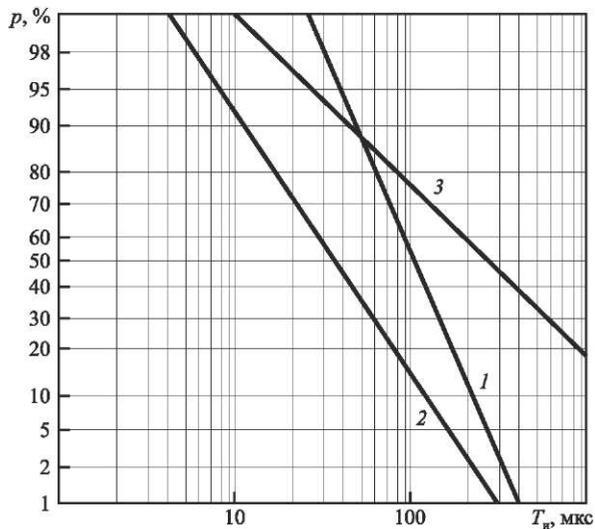
отрицательных молний (зависимость 2) много меньше при той же вероятности, чем первых (зависимость 1), которая, в свою очередь, гораздо меньше длительности фронта тока положительных молний (зависимость 3).

Распределение длительностей импульсов  $T_{и}$  приведены на рис. 9.15. Наименьшими длительностями обладают импульсы тока повторных разрядов отрицательных молний (зависимость 2), наибольшими – положительных (зависимость 3).



**Рис. 9.14. Статистические данные о длительностях фронта токов молнии:**

1 – первые импульсы отрицательных молний; 2 – вторые импульсы отрицательных молний;  
3 – импульсы положительных молний



**Рис. 9.15. Статистические данные о длительностях импульсов токов молнии:**

1 – первые импульсы отрицательных молний; 2 – повторные импульсы отрицательных молний;  
3 – импульсы положительных молний

В результате непосредственных измерений крутизны тока молнии установлено, что наибольшее значение крутизны тока молнии наблюдается при повторных импульсах токов главных разрядов отрицательных молний. Это связывается с тем, что канал разряда расширен и прогрет за счет тока первого импульса и тока, протекающего по каналу в интервале между импульсами. Этим самым не только обеспечивается повторный пробой по уже существующему каналу от облака к земле, но и облегчается нейтрализация зарядов, сообщенных каналу после пробоя.

Вероятность  $p$  того, что крутизна тока повторных всплесков отрицательных молний равна заданному значению  $a$  или превышает его, приведена на рис. 9.16 (зависимость 1). Для расчетов перенапряжений в линиях электропередачи принята следующая формула для вероятности крутизны тока ( $a$  – в кА/мкс):

$$p_a = \exp\left(-\frac{a}{36}\right), \quad (9.9)$$

Эта зависимость воспроизведена на рис. 9.16 (зависимость 2). Так как она учитывает вероятности при любых типах молний, а также крутизны токов, измеренных в линиях при грозовых разрядах, не обязательно совпадающих с токами повторных импульсов, то различие зависимостей 1 и 2 на рис. 9.16 является естественным.

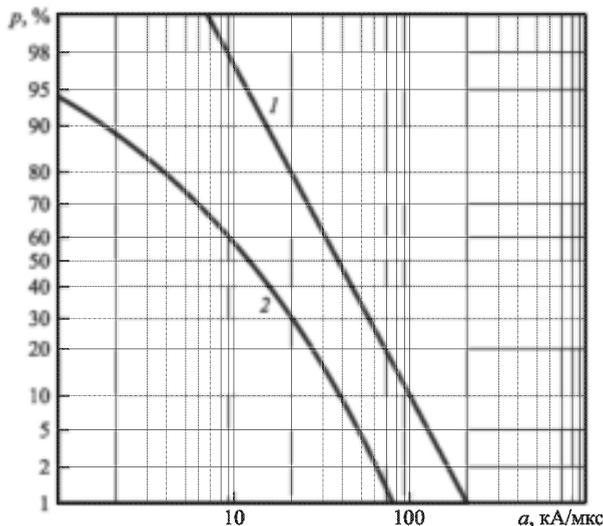


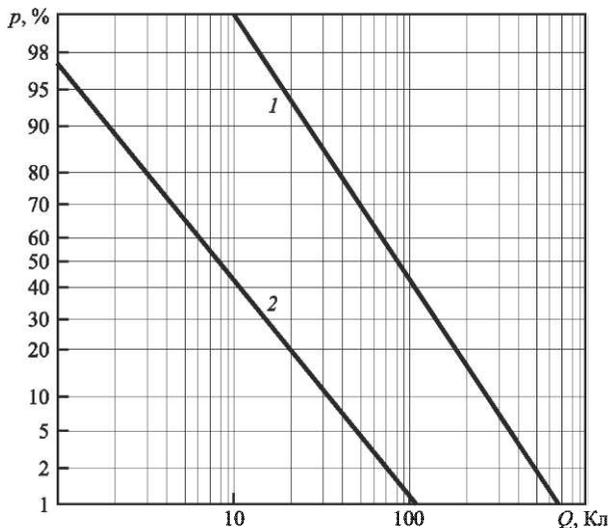
Рис. 9.16. Статистические данные о крутизне токов молнии:

1 – повторные импульсы отрицательных молний;  
2 – зависимость, рассчитанная по (9.9)

Так как условия накопления отрицательных и положительных зарядов в грозовом облаке не одинаковы и по-разному формируются каналы разряда, то и заряды, переносимые токами с облака на землю, оказываются не одинаковыми при разных видах молнии. Статистические данные о зарядах  $Q$ , переносимых на землю при положительных и отрицательных молниях, приведены на рис. 9.17. Как видно, заряд  $Q$  положительных молний (зависимость 1) намного больше, чем отрицательных (зависимость 2).

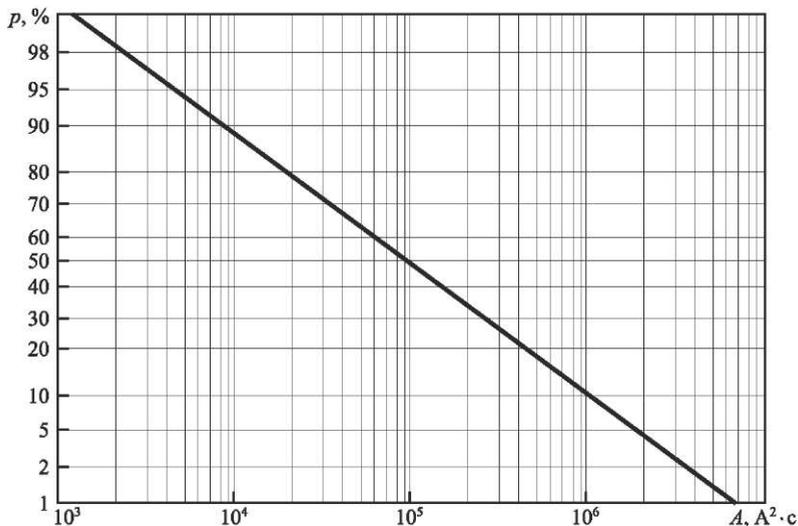
Удельная энергия, или интеграл квадрата тока молнии по времени  $A = \int i^2 dt$  в основном определяется импульсными составляющими тока. Вклад постоянной составляющей

тока молнии в интеграл  $A$  незначителен. Как и заряд  $Q$ , энергия  $A$  при положительных молниях выше, чем при отрицательных. Обобщенная вероятность  $p$  того, что  $A$  равно заданному значению или превысит его, приведена на рис. 9.18.



**Рис. 9.17. Статистические данные о зарядах, переносимых токами молний:**

*1* – положительные молнии; *2* – отрицательные молнии

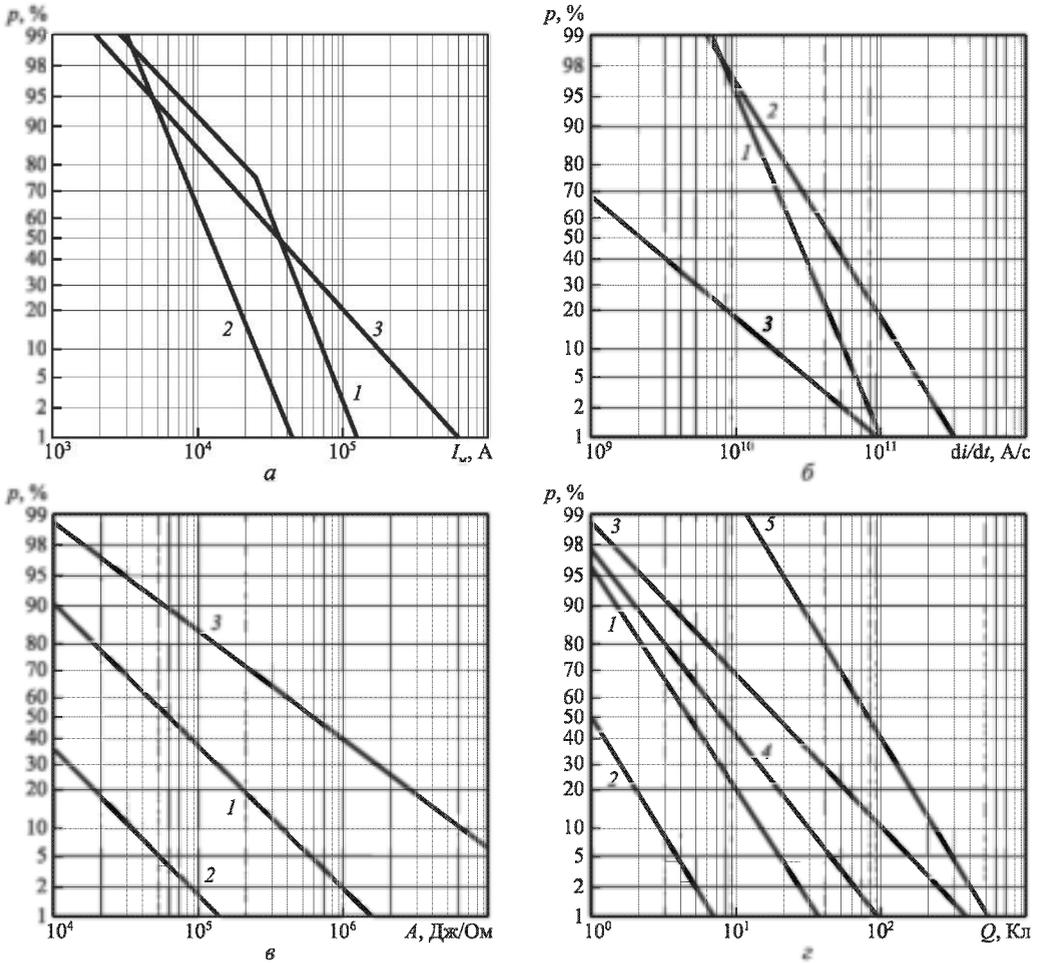


**Рис. 9.18. Статистические данные об удельной энергии  $A$**

Обобщенные МЭК статистические данные, отражающие более полные сведения о параметрах токов различных видов молний и их компонентов, приведены на рис. 9.19.

На их основании были приняты следующие параметры испытательных импульсов токов молнии.

Длительности фронта испытательных импульсов тока молнии, определяемые как 1,25 интервала времени между значениями тока 0,1 и 0,9 от максимального значения, следующие: первый импульс – 10 мкс, повторный – 0,25 мкс. Длительности импульсов (интервал времени от начала импульса до момента снижения тока до половины максимального значения) составляют: первый импульс – 350 мкс; последующий – 100 мкс.



**Рис. 9.19. Вероятностные характеристики параметров токов молнии:**

*a* – максимальный ток; *б* – максимальная крутизна; *в* – удельная энергия; *г* – заряд; *1* – первый импульс отрицательной молнии; *2* – второй импульс отрицательной молнии; *3* – импульс положительной молнии; *4* – суммарный заряд, переносимый током отрицательной молнии; *5* – суммарный заряд, переносимый током положительной молнии

При решении вопросов молниезащиты приняты следующие испытательные импульсы:

- первый импульс 10/350 мкс (положительно заряженное облако);
- повторный импульс 0,25/100 мкс (второй импульс тока при отрицательном заряде облака).

Введены четыре уровня защиты, характеризующие вероятность того, что параметр не превысит указанного значения:

- I уровень, вероятность 0,99;
- II уровень, вероятность 0,97;
- III уровень, вероятность 0,91;
- IV уровень, вероятность 0,84.

Параметры испытательных импульсов приведены в табл. 9.1–9.3.

Таблица 9.1

### Параметры первого импульса

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III–IV
Максимальное значение тока, кА	200	150	100
Заряд, Кл	100	75	50
Удельная энергия, МДж/Ом	10	5,6	2,5

Таблица 9.2

### Параметры второго импульса

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III–IV
Максимальное значение тока, кА	50	37,5	25
Средняя крутизна, кА/мкс	200	150	100

Таблица 9.3

### Параметры постоянной составляющей

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III–IV
Заряд, Кл	200	150	100
Длительность, с	0,5		

Характерные параметры главной стадии отрицательной молнии, обобщенные и рекомендуемые в последних нормативных документах СИГРЭ для инженерного пользования, представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

**Параметры главной стадии  
отрицательной нисходящей молнии [СИГРЭ]**

Параметры	Вероятность превышения указанного значения, %		
	95	50	5
Амплитуда тока (минимум 2 кА), кА			
Первый удар	14	30	80
Последующие удары	4,6	12	30
Заряд (суммарный, с учетом сопровождающего тока), Кл			
Первый удар	1,1	5,2	24
Последующие удары	0,2	1,4	11
Завершающий удар	1,3	7,5	40
Заряд (импульсный, без учета сопровождающего тока), Кл			
Первый удар	1,1	4,5	20
Последующие удары	0,22	0,95	4
Длительность фронта, мкс			
Первый удар	1,8	5,5	18
Последующие удары	0,22	1,1	4,5
Максимальная крутизна фронта импульса тока (dI/dt), кА/мкс			
Первый удар	5,5	12	32
Последующие удары	12	40	120
Длительность импульса тока, мкс			
Первый удар	30	75	200
Последующие удары	6,5	32	140
Удельная энергия (интеграл действия), А <sup>2</sup> ·с			
Первый удар	6,0 · 10 <sup>3</sup>	5,5 · 10 <sup>4</sup>	5,5 · 10 <sup>5</sup>
Последующие удары	5,5 · 10 <sup>2</sup>	6,0 · 10 <sup>3</sup>	5,2 · 10 <sup>4</sup>
Интервал между компонентами, мс			
	7	33	150
Длительность вспышки, мс			
Все вспышки	0,15	13	1100
Только многокомпонентные	31	180	900

## 9.5. Защита от прямых ударов молнии

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю.

Защитное действие молниеотводов основано на том, что во время лидерной стадии молнии на вершине молниеотвода скапливаются заряды, и наибольшие напряженности электрического поля создаются на пути между развивающимся нисходящим лидером и вершиной молниеотвода.

Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженность поля на этом пути, что окончательно предопределяет удар в молниеотвод. Защищаемый объект, более низкий, чем молниеотвод, будучи расположен поблизости от него, оказывается заэкранированным молниеотводом и встречным лидером, и поэтому поражение его молнией маловероятно. Необходимым условием надежной защиты является также низкое сопротивление заземления молниеотвода.

Основными действующими в России нормативными документами по защите зданий, сооружений и инженерных коммуникаций от прямых ударов молнии являются РД 34.21.122–87 и СО-153-34.21.122–2003.

Молниеотводы по типу молниеприемников разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые – в виде горизонтально подвешенных проводов. По опорам, к которым крепится трос, прокладываются токоотводы, соединяющие трос с заземлителем.

Защитное действие молниеотвода характеризуется его зоной защиты, т.е. пространством вблизи молниеотвода, вероятность попадания молнии в которое не превышает определенного достаточно малого значения, а также значением сопротивления заземления и конструкцией заземлителя.

Стандартной зоной защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h$  является круговой конус высотой  $h_0 < h$ , вершина которого совпадает с вертикальной осью молниеотвода (рис. 9.20). Габариты зоны определяются двумя параметрами: высотой конуса  $h_0$  и радиусом конуса на уровне земли  $r_0$ .

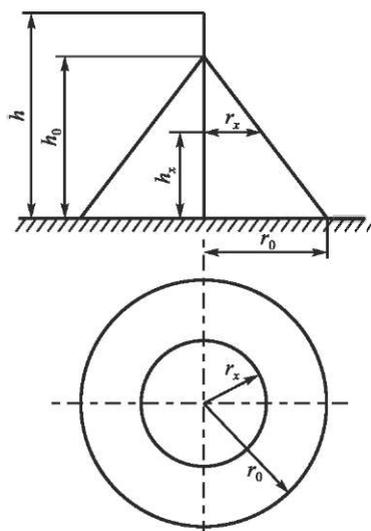


Рис. 9.20. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

Формулы для расчета зон защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 150 м приведены в табл. 9.5. Для зоны защиты требуемой надежности (см. рис. 9.20) радиус горизонтального сечения  $r_x$ , на высоте  $h_x$  определяется по формуле

$$r_x = \frac{r_0 (h_0 - h_x)}{h_0} \quad (9.10)$$

## Расчет зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надежность защиты $P_s$	Высота молниеотвода $h$ , м	Высота конуса $h_0$ , м	Радиус конуса $r_0$ , м
0,9	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$[1,2-10^{-3}(h-100)]h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,8-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,8-10^{-3}(h-100)]h$	$0,7h$
0,999	От 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	От 30 до 100	$[0,7-7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[0,6-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,65-10^{-3}(h-100)]h$	$[0,5-2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

Стандартные зоны защиты одиночного тросового молниеотвода высотой  $h$  ограничены симметричными двускатными поверхностями, образующими в вертикальном сечении равнобедренный треугольник с вершиной на высоте  $h_0 < h$  и основанием на уровне земли  $2r_0$  (рис. 9.21).

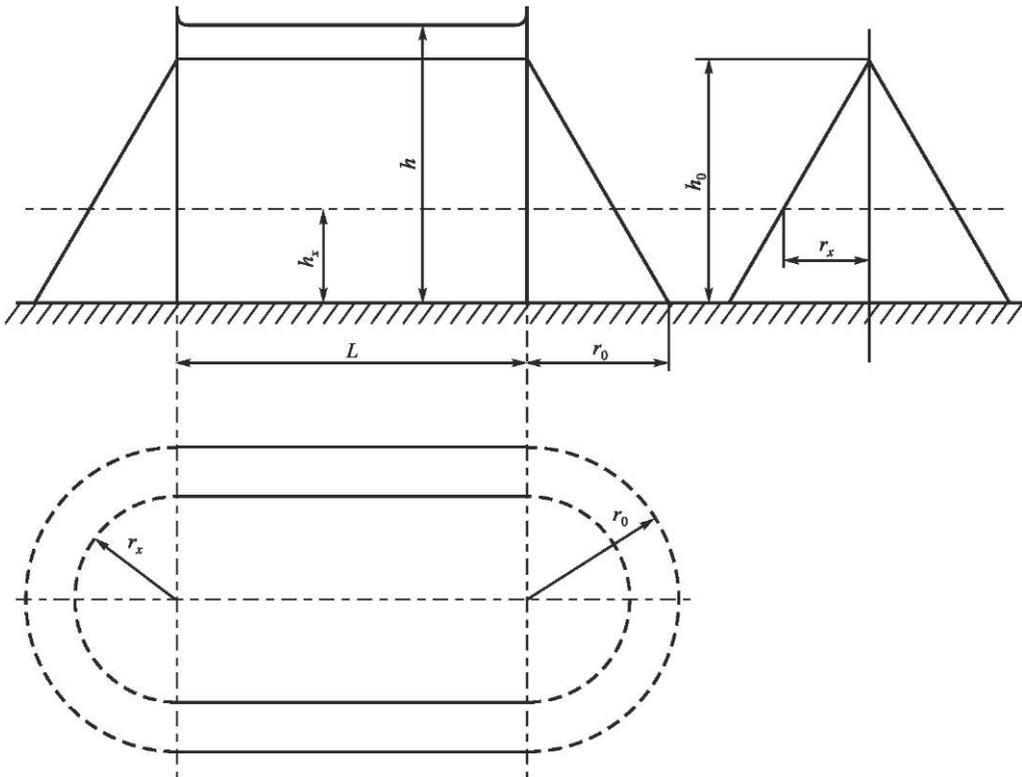


Рис. 9.21. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода:

$L$  – расстояние между точками подвеса тросов

Формулы для расчета зон защиты одиночного тросового молниеотвода высотой до 150 м приведены в табл. 9.6. Здесь и далее под  $h$  понимается минимальная высота троса над уровнем земли (с учетом провеса).

Таблица 9.6

**Параметры зоны защиты одиночного тросового молниеотвода**

Надежность защиты $P_3$	Высота молниеотвода $h$ , м	Высота конуса $h_0$ , м	Радиус конуса $r_0$ , м
0,9	От 0 до 150	$0,87h$	$1,5h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,95h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,95-7,14 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$0,8h$	$[0,9-10^{-3}(h-100)]h$
0,999	От 0 до 30	$0,75h$	$0,7h$
	От 30 до 100	$[0,75-4,28 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$	$[0,7-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[0,72-10^{-3}(h-100)]h$	$[0,6-10^{-3}(h-100)]h$

Полуширина  $r_x$  зоны защиты требуемой надежности (см. рис. 9.21) на высоте  $h_x$  от поверхности земли определяется выражением (9.10).

При необходимости расширить защищаемый объем к торцам зоны защиты собственно тросового молниеотвода могут добавляться зоны защиты несущих опор, которые рассчитываются по формулам одиночных стержневых молниеотводов, представленным в табл. 9.5. В случае больших провесов тросов, например у ВЛ, рекомендуется рассчитывать обеспечиваемую вероятность прорыва молнии программными методами, поскольку построение зон защиты по минимальной высоте троса в пролете может привести к неоправданным запасам.

Молниеотвод считается двойным стержневым, когда расстояние между стержневыми молниеотводами  $L$  не превышает предельного значения  $L_{\max}$ . В противном случае оба молниеотвода рассматриваются как одиночные стержневые молниеотводы.

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного стержневого молниеотвода (высотой  $h$  и расстоянием  $L$  между молниеотводами) представлена на рис. 9.22. Построение внешних областей зон двойного молниеотвода (полуконусов с габаритами  $h_0, r_0$ ) производится по формулам табл. 9.5 для одиночных стержневых молниеотводов.

Размеры внутренних областей определяются параметрами  $h_0$  и  $h_c$ , первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у молниеотводов, а второй – минимальную высоту зоны по середине между молниеотводами. При расстоянии между молниеотводами  $L \leq L_c$  граница зоны не имеет провеса ( $h_c = h_0$ ). Для расстояний  $L_c < L < L_{\max}$  высота  $h_c$  определяется по выражению:

$$h_c = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0. \tag{9.11}$$

Входящие в это выражение предельные расстояния  $L_{\max}$  и  $L_c$  вычисляются по эмпирическим формулам табл. 9.7, пригодным для молниеотводов высотой до 150 м.

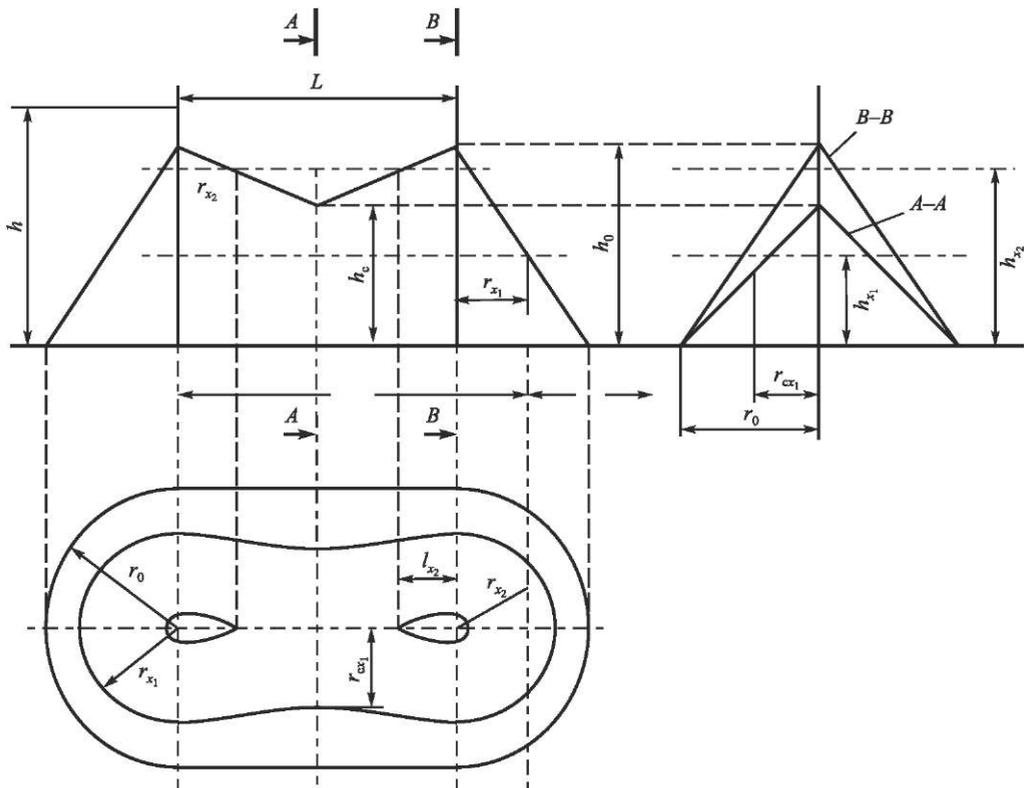


Рис. 9.22. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

Таблица 9.7

Параметры зоны защиты двойного стержневого молниеотвода

Надежность защиты $P_3$	Высота молниеотвода $h$ , м	$L_{max}$ , м	$L_c$ , м
0,9	От 0 до 30	$5,75h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$[5,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5h$
	От 100 до 150	$5,5h$	$2,5h$
0,99	От 0 до 30	$4,75h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-0,0107(h-30)]h$
	От 100 до 150	$4,5h$	$1,5h$
0,999	От 0 до 30	$4,25h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,25-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-0,0107 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$4,0h$	$1,5h$

Размеры горизонтальных сечений зоны вычисляются по следующим формулам, общим для всех уровней надежности защиты:

- максимальная полуширина зоны  $r_x$  в горизонтальном сечении на высоте  $h_x$

$$r_x = \frac{r_0 (h_0 - h_x)}{h_0}; \quad (9.12)$$

- длина горизонтального сечения  $l_x$  на высоте  $h_x \geq h_c$ :

$$l_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}, \quad (9.13)$$

причем при  $h_x < h_c$ ,  $l_x = L/2$ ;

- ширина горизонтального сечения в центре между молниеотводами  $2r_{cx}$  на высоте  $h_x \leq h_c$

$$r_{cx} = \frac{r_0 (h_c - h_x)}{h_c}. \quad (9.14)$$

Молниеотвод считается двойным тросовым, когда расстояние между тросами  $L$  не превышает предельного значения  $L_{\max}$ . В противном случае оба тросовых молниеотвода рассматриваются как одиночные тросовые молниеотводы.

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного тросового молниеотвода (высотой  $h$  и расстоянием между тросами  $L$ ) представлена на рис. 9.23. Построение внешних областей зон (двух односкатных поверхностей с габаритами  $h_0, r_0$ ) производится по формулам табл. 9.6 для одиночных тросовых молниеотводов.

Размеры внутренних областей определяются максимальной высотой зоны  $h_0$  непосредственно у тросов и минимальной высотой зоны посередине между тросами  $h_c$ . При расстоянии между тросами  $L \leq L_c$  граница зоны не имеет провеса ( $h_c = h_0$ ). Для расстояний  $L_c \leq L \leq L_{\max}$  высота  $h_c$  определяется по выражению

$$h_c = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0. \quad (9.15)$$

Входящие в это выражение предельные расстояния  $L_{\max}$  и  $L_c$  вычисляются по эмпирическим формулам табл. 9.8, пригодным для тросов с высотой подвеса до 150 м.

Длина горизонтального сечения зоны защиты на высоте  $h_x$  определяется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} l_x &= \frac{L}{2} && \text{при } h_c \geq h_x; \\ l_x &= \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)} && \text{при } 0 < h_c < h_x. \end{aligned} \right\} \quad (9.16)$$

Для расширения защищаемого объема на зону двойного тросового молниеотвода может быть наложена зона защиты опор, несущих тросы, которая строится как зона двойного стержневого молниеотвода, если расстояние  $L$  между опорами меньше  $L_{\max}$ , вычисленного по формулам табл. 9.7. В противном случае опоры рассматриваются как одиночные стержневые молниеотводы.

Когда тросы непараллельны или разновысоки, либо их высота изменяется по длине пролета, для оценки надежности их защиты следует воспользоваться специальным программным обеспечением. Так же рекомендуется поступать при больших провесах тросов в пролете, чтобы избежать излишних запасов по надежности защиты.

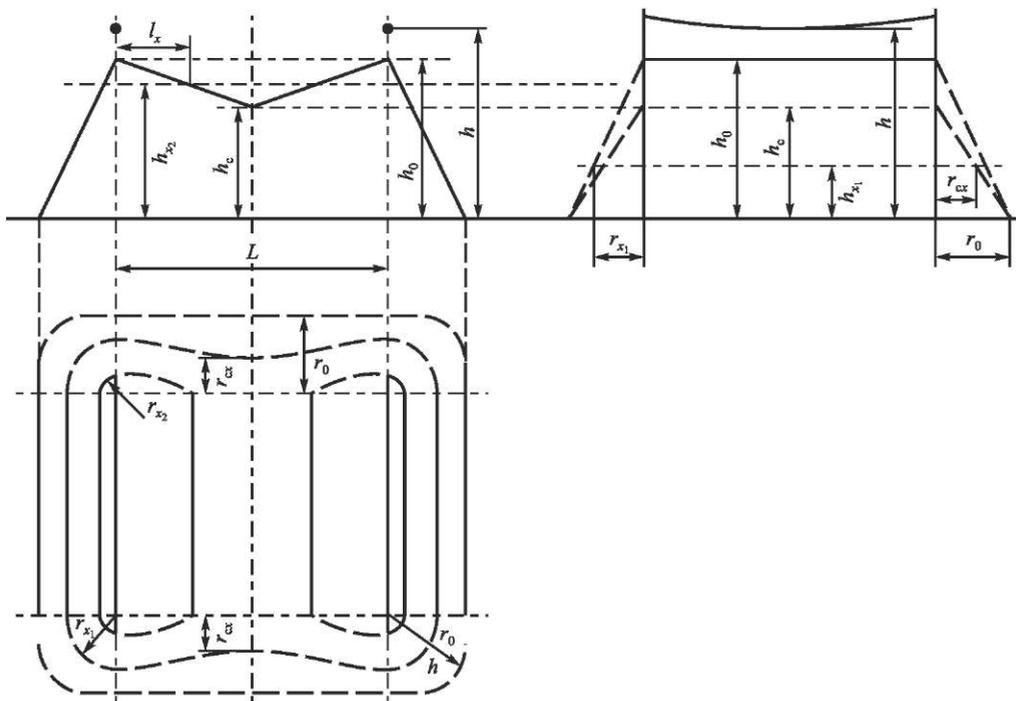


Рис. 9.23. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

Таблица 9.8

Параметры зоны защиты двойного тросового молниеотвода

Надежность защиты $P_3$	Высота молниеотвода $h$ , м	$L_{\max}$ , м	$L_0$ , м
0,9	От 0 до 150	$6,0h$	$3,0h$
0,99	От 0 до 30	$5,0h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$5,0h$	$[2,5-7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[5,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$
0,999	От 0 до 30	$4,75h$	$2,25h$
	От 30 до 100	$[4,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	От 100 до 150	$[4,5-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

## 9.6. Поражаемость воздушных линий электропередачи молнией

Воздушные линии электропередачи подвергаются ежегодно десяткам ударов молнии в каждые 100 км линии. По данным ОАО «НИИПТ» опыт эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛ) 110–750 кВ показывает, что доля грозových отключений линий может составлять от 15 до 50 % общего числа отключений, поэтому надежность их работы в значительной мере определяется техническими качествами систем молниезащиты.

Поражение молнией фазного провода, сопровождающееся прохождением большого тока, создает на проводе такое высокое импульсное напряжение, что практически невозможно создать изоляцию, которая могла бы его выдержать. Поэтому в большинстве случаев линии на металлических и железобетонных опорах номинальным напряжением 110 кВ и выше имеют один или два заземленных троса, подвешиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя удар молнии.

Другие традиционные мероприятия повышения грозоупорности ВЛ направлены на снижение вероятности перекрытия линейной изоляции при ударах молнии в ЛЭП, включая:

- 1) снижение импульсного сопротивления заземления опор;
- 2) повышение импульсной прочности линейной изоляции.

К современным методам и средствам повышения грозоупорности линий электропередачи относят:

- 1) установку подвесных ограничителей перенапряжений (ОПН) параллельно гирляндам изоляторов;
- 2) установку длинно-искровых разрядников (РДИ) и применение гирлянд изоляторов-разрядников с мультикамерной (ИРМК) системой гашения дуги.

Применение подвесных ОПН направлено на снижение вероятности перекрытия линейной изоляции за счет ограничения импульсных перенапряжений на уровне, не превышающем импульсную прочность гирлянд изоляторов.

Применение устройств РДИ и гирлянд ИРМК не имеет целью исключение перекрытий линейной изоляции, а направлено на снижение вероятности перехода импульсного перекрытия в устойчивую силовую дугу, при возникновении которой происходит отключение ВЛ.

Эффективность всех средств молниезащиты ВЛ существенно зависит как от количества ударов молнии в линию электропередачи, так и от того, в какой из элементов ЛЭП (фазный провод, молниезащитный трос, опора) непосредственно произошел удар молнии.

По российским нормативам, число ударов молнии на 100 км длины воздушной линии рассчитывается по формулам:

– при  $h_{\text{тр.ср}} \leq 30$  м

$$N = 0,2n_0 \left( \frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + 5h_{\text{тр.ср}} - \frac{2h_{\text{тр.ср}}^2}{30} \right); \quad (9.17)$$

– при  $h_{\text{тр.ср}} > 30$  м

$$N = 0,15n_0 \left( \frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + h_{\text{тр.ср}} + 90 \right). \quad (9.18)$$

В указанных формулах плотность разрядов молнии в землю для равнинной местности рекомендуется рассчитывать по формуле  $n_0 = 0,05D_r$  уд/(км<sup>2</sup> · год);  $h_{тр\text{ ср}}$  – средняя высота подвеса троса;  $d_{тр-тр}$  – расстояние между тросами, м (для ВЛ с одним тросом  $d_{тр-тр} = 0$ ).

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, т.е. поражения фазного провода, в первом приближении, может быть оценена в соответствии с опытом эксплуатации по эмпирической формуле

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_{он}}}{90} - 4, \quad (9.19)$$

где  $h_{он}$  – высота опоры, м;  $\alpha$  – угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Для ВЛ 110–750 кВ при положительных углах защиты троса (трос расположен ближе к оси опоры, чем провод) вероятность прорыва молнии на провода в действующих российских документах рекомендуется определять по эмпирической формуле

$$P_\alpha = \exp \left[ \frac{1}{D_U} \left( 3,2 \frac{\Delta d}{\Delta h} \sqrt{\frac{h_{тр}}{\Delta h}} - \frac{9}{D_U} \right) \right], \quad (9.20)$$

где

$$D_U = 1 + \frac{U_n}{100 \Delta h} \left( 0,75 \frac{h_{тр}}{\Delta h} \frac{Q}{Q + Q_0} \right)^3; \quad Q_0 = 200^{\left( \frac{1+0,1 \cdot U_n}{1000} \right)}; \quad Q = \frac{U_n}{\ln \frac{2h_{ср.пр}}{r_{пр}}};$$

$U_n$  – номинальное напряжение линии, кВ;  $\Delta h$  – разность высот подвеса проводов и тросов на опоре, м;  $\Delta d$  – смещение троса и провода по горизонтали, м;  $h_{тр}$  – высота подвеса троса на опоре, м;  $r_{пр}$  – радиус провода (для расщепленной фазы – эквивалентный радиус  $r_\phi$ ), м;  $h_{ср.пр}$  – средняя высота подвеса провода, м.

Зарубежные нормативные документы, основанные на электрогеометрическом подходе, при расчетах поражаемости ВЛ оперируют расстоянием (дистанцией) поражения  $R_{ст}$ , под которой понимается кратчайшее расстояние между нисходящим лидером и точкой удара на каком-то из элементов ВЛ в момент начала развития от него встречного разряда.

Это расстояние тем больше, чем выше заряд лидера и, соответственно, выше максимальное значение тока молнии, проходящего через поражаемый объект.

$$R_{ст} = DI_r^E, \quad (9.21)$$

где  $I_m$  – соответствующая амплитуда тока молнии, кА;  $R_{ст}$  – в метрах;  $D$  и  $E$  – параметры.

Рассмотрим применение электрогеометрического метода на примере расчета вероятности прорыва молнии на провода линии электропередачи (рис. 9.24). В зависимости от траектории канал лидера молнии попадает в зону захвата троса  $A$ , в зону захвата провода  $B$  или в зону захвата земли  $C$ . Границей зон захвата молнии тросом и проводом является в поперечном сечении прямая, которая представляет собой перпендикуляр  $l$ , восстановленный в середине отрезка, соединяющего трос и провод.

Уравнение границы захвата в координатах  $xOy$ :

$$y = y_b + \frac{\Delta S}{\Delta h} x = h_{тр} + \frac{d^2}{2\Delta h} + \frac{\Delta S}{\Delta h} x, \quad (9.22)$$

где  $y_b$  – координата точки  $b$  на оси  $y$ ;  $\Delta S$  и  $\Delta h$  – смещение провода относительно троса, соответственно, по горизонтали и вертикали;  $h_{\text{пр}}$  – высота подвеса провода на опоре;  $d$  – расстояние между тросом и проводом.

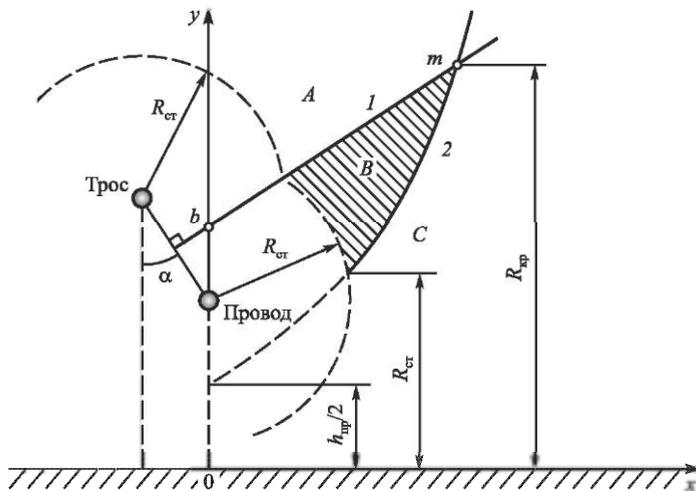


Рис. 9.24. К расчету поражаемости линии электропередачи по электрогеометрической методике

Граница между зонами захвата молнии проводом и поверхностью земли при разных значениях тока молнии (разных значениях  $R_{\text{ст}}$ ) представляет собой в сечении геометрическое место точек, равноудаленных от провода и от земли, т.е. параболу, в фокусе которой расположен провод.

$$y = \frac{x^2}{2h_{\text{пр}}} + \frac{h_{\text{пр}}}{2}. \quad (9.23)$$

Зона захвата провода  $B$  с увеличением  $R_{\text{ст}}$  и, соответственно, с ростом тока молнии  $I_m$  сокращается. В точке  $m$  смыкаются между собой зоны захвата троса и земли, а зона захвата провода становится равной нулю. Совместное решение уравнения (9.22) и (9.23) позволяет найти критическое расстояние поражения:

$$R_{\text{кр}} = h_{\text{пр}} \left[ 1 + (\text{tg} \alpha)^2 + \frac{d}{2h_{\text{пр}} \cos \alpha} + \text{tg} \alpha \sqrt{1 + (\text{tg} \alpha)^2 + \frac{d}{h_{\text{пр}} \cos \alpha}} \right], \quad (9.24)$$

где  $\alpha$  – угол защиты троса;  $\text{tg} \alpha = \Delta S / \Delta h$ .

Соответствующий  $R_{\text{кр}}$  ток молнии может быть определен по выражению:

$$I_{\text{кр}} = \left[ \frac{\gamma (h_{\text{пр}} + h_{\text{пр}}) / 2}{A(1 - \gamma \sin \alpha)} \right]^{1/B}, \quad (9.25)$$

где  $I_{\text{кр}}$  – в кА; параметры  $A$ ,  $B$  и  $\gamma$  даются в нормативных документах; высоты и угол защиты троса определяются по рис. 9.24.

Поражение провода молнией возможно только при токах, меньших критического. При токах, больших критического уровня, и соответствующих им дистанциях поражения провода молнией невозможны. Тогда вероятность поражения провода молнией определяется как  $P_{\alpha} = 1 - P(I_m)$ , соответственно,  $P(I_m)$  является показателем эффективности защиты.

## 9.7. Исследование физики молнии и молниезащиты с помощью искусственных заряженных аэрозольных облаков

Исследование проблемы инициирования и развития разряда заряженных капель воды в электрически активных облаках и нейтрализации облачного заряда является важным для более глубокого понимания физики разряда молнии, для того чтобы ответить на такие вопросы как:

- где будут происходить разряды внутри грозового облака;
- в какой степени облако будет разряжено;
- как влияют разрядные процессы в облаке на распространение разряда молнии;
- каковы шансы возникновения повторных разрядов и где они могут случиться и т.д., которые поставлены в исследованиях разряда молнии и атмосферного электричества.

Остаются открытыми такие важные вопросы о том, как присутствие крупных гидрометеоров будет влиять на развитие разрядов внутри облака и как протяженные объемы облачного заряда эффективно нейтрализуются молнией, без ответа на которые невозможно продвинуться в создании общей теории разряда молнии и физики грозы. В настоящее время нет единого взгляда на роль развития разрядных процессов в заряженных областях грозового облака на разных этапах возникновения и распространения молнии. Это связано с тем, что представления о разрядных процессах внутри электрически активных облаков во многом основывались на мало информативных для этой цели наземных измерениях электромагнитного излучения разряда, а детали и многие разрядные формы из-за дистанционности в них просто не проявлялись.

Поражение наземных объектов молнией определяется возникновением и распространением с наземного объекта (молниеотвода) восходящего/встречного положительного лидера в электрическом поле грозового облака и нисходящего лидера молнии.

Среди ключевых направлений физики молнии и современной молниезащиты – исследование процессов формирования встречных и восходящих разрядов с наземных объектов в поле грозового облака и нисходящего лидера молнии, включая:

- условия формирования восходящих и встречных лидерных разрядов с наземных объектов и их связи с характеристиками грозовых облаков и параметрами наземных объектов;
- влияние параметров молниеотвода и объекта (формы, радиусов кривизны вершины) на процессы инициирования и распространения восходящего (встречного) лидера с молниеотвода и защищаемого объекта;
- конкурентные процессы возникновения восходящих (встречных) лидерных разрядов с молниеотвода и защищаемого объекта;
- влияние коронного разряда с элементов конструкции молниеотводов и защищаемых объектов на процесс поражения их молнией;
- взаимное влияние высоких объектов и электрически активных облаков.

С достаточной точностью пока так и не установлены очень важные при инженерных приложениях физики молнии и молниезащиты корреляционные зависимости как между характеристиками самой главной стадии, так и между ними и параметрами предшествующей лидерной стадии, среди них:

- скорости нейтрализации и амплитуды тока главного разряда;
- амплитуды тока главной стадии и заряда предшествующего ему нисходящего лидера;
- амплитуды тока молнии и его максимальной крутизны и другие.

Знание этих зависимостей даст возможность гораздо точнее прогнозировать случаи ударов молнии в летательный аппарат в полете и в различные объекты на земле.

Одним из подходов к решению этих проблем является применение искусственных заряженных облаков водного аэрозоля (искусственных грозовых ячеек) с предельной плотностью заряда, способных инициировать электрические разряды (аналоги разрядов молнии) и исследовать процессы формирования стадий разряда в ситуации, характерной для естественной природной ситуации, в лабораторных условиях.

На кафедре техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ» создан экспериментальный комплекс, предназначенный для создания в воздушной среде протяженных заряженных аэрозольных образований (искусственных грозовых ячеек) с предельной плотностью заряда (до  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>), обеспечивающей возникновение протяженных электрических разрядов, моделирующих молнию (рис. 9.25). Электрические потенциалы создаваемых облаков достигают нескольких мегавольт и создаются сильные электрические поля (с напряженностью, превышающей 10 кВ/см) в протяженных областях (с линейным размером, составляющим десятки метров).

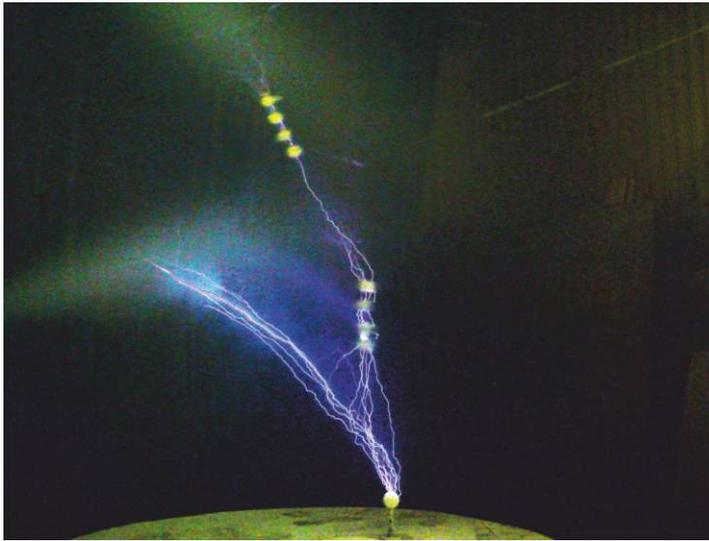


**Рис. 9.25. Искусственное облако заряженного водного аэрозоля и электрические искровые разряды, инициированные с заземленного электрода**

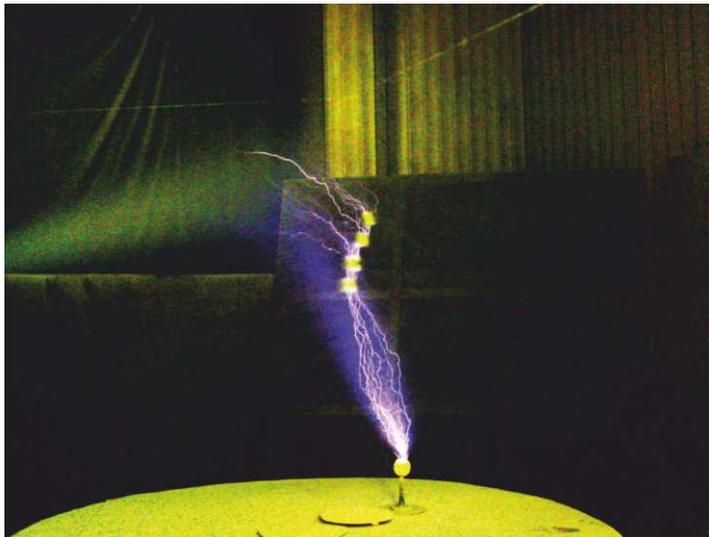
Одно из направлений исследований – физическое моделирование влияния гидрометеоров на условия инициирования и распространения разрядных явлений (молнии) в природных электрически активных облаках (грозовых облаках) и вблизи них.

Установлено, если группа модельных гидрометеоров (металлических предметов) с относительно небольшим коэффициентом усиления электрического поля располагается недалеко от границ облака заряженного аэрозоля и/или в промежутке между облаками (рис. 9.26) или облаком и землей (рис. 9.27), она может способствовать инициированию разряда и/или его дальнейшему распространению.

Это коррелируется с реальными грозовыми условиями, как по напряженности облачных электрических полей, так и по размерам и виду гидрометеоров. При этом, инициирование и развитие разряда из облака заряженного аэрозоля проходит в намного более стабильной форме в присутствии групп модельных гидрометеоров, чем без них.



**Рис. 9.26. Группа изолированных цилиндрических проводящих гидрометеоров инициирует и «направляет» разряд между искусственными грозowymi ячейками и землей**



**Рис. 9.27. Группа изолированных цилиндрических проводящих гидрометеоров инициирует и «направляет» разряд между искусственной грозовой ячейкой и землей**

Одним из направлений при экспериментальном определении вероятности поражения объектов разрядом молнии может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков. Существующие методы создания искусственных грозowych ячеек позволяют создавать облака объемом до десятков кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Это открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией. Во-первых,

это существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке. Во-вторых, такой подход может значительно упростить экспериментальное моделирование процесса поражения молнией наземных объектов и даст возможность получать достаточный для анализа статистический материал.

При исследовании процессов поражения разрядом из искусственного облака заряженного аэрозоля моделей сосредоточенных объектов установлено, что возникновение и распространение восходящего встречного лидерного разряда с вершины модели молниеотвода в подавляющем большинстве случаев подавляет развитие лидера с модели защищаемого объекта, на котором наблюдается только слабая корона (рис. 9.28).

Выявлено значительное влияние размеров вершины модели стержневого молниеотвода  $r_m$  на вероятность поражения модели защищаемого объекта разрядом из облака. При варьировании радиуса сферической вершины модели стержневого молниеотвода в диапазоне от 0,1 см до 3,5 см при фиксированном угле защиты  $\alpha$  (радиус сферической вершины модели сосредоточенного объекта  $r_{об}$  составлял 2,3 см), вероятность  $P_{\alpha}$  поражения модели защищаемого объекта разрядом из искусственного грозового облака изменялась в диапазоне от 0,018 (при  $r_m = 2,2-2,4$  см) до 0,864 (при  $r_m = 0,1$  см). Причем, когда радиус сферической вершины модели стержневого молниеотвода  $r_m$  становится меньше чем 0,7 см, вероятности поражения модели объекта разрядом из облака резко возрастала (кривая 1 на рис. 9.29).

При малых радиусах сферической вершины модели стержневого молниеотвода коронный разряд возникает раньше и экранирует вершину молниеотвода от действия электрического поля заряженного аэрозольного облака. В результате возникновение восходящего лидера с вершины стержневого молниеотвода или подавляется, или задерживается. Все это увеличивает вероятность появления разряда со стержневого электрода с большим радиусом вершины (модели защищаемого объекта) и, соответственно, вероятность поражения модели защищаемого объекта разрядом из искусственного грозового облака (кривая 1 на рис. 9.29).

Выявлено, что наиболее высокая вероятность возникновения восходящего лидера с модели стержневого молниеотвода, защищающего модель сосредоточенного объекта, обеспечивается тогда, когда радиус сферической вершины модели стержневого молниеотвода находится в диапазоне от 2,0 см до 3,0 см.

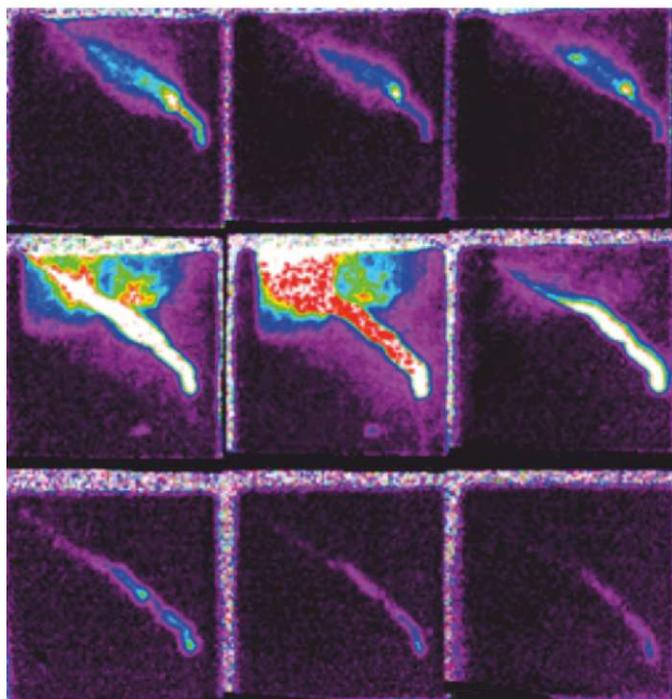
Дальнейшее увеличение радиуса сферической вершины модели стержневого молниеотвода может оказаться не эффективным, так в этом случае коэффициент усиления электрического поля на вершине электрода будет относительно небольшим, и условия для формирования с него встречного (восходящего) лидера потребует достаточно сильного внешнего поля. В результате, возникновение восходящего лидера с вершины молниеотвода может произойти позже, чем формирование восходящего разряда с защищаемого объекта. Защитное действие молниеотвода в этом случае станет менее эффективным.

Экспериментально установлено аналогичное влияние размеров модели тросового молниеотвода  $r_m$  на вероятность поражения модели фазного провода разрядом из облака (рис. 9.30). При варьировании радиусов модели тросового молниеотвода в диапазоне от 0,1 см до 3,0 см при фиксированном угле защиты  $\alpha$  (радиус модели фазного провода  $r_{об}$  составлял 1,8 см), вероятность  $P_{\alpha}$  поражения модели защищаемого объекта разрядом из искусственного грозового облака изменялась в диапазоне от 0,0011 (при  $r_m = 0,8$  см) до 0,287 (при  $r_m = 0,1$  см). Причем в диапазоне радиусов модели тросового молниеотвода  $r_m$  от 0,6 см до 1,4 см, вероятность поражения модели фазного провода разрядом из облака была минимальна (кривая 2 на рис. 9.29). При таких размерах модели тросового

молниеотвода коэффициент усиления и характер распределения электрического поля вблизи модели троса создают наиболее подходящие условия для старта с него восходящего (встречного) лидера и, соответственно, выполнения своего назначения.



*a*



*б*

**Рис. 9.28. Поражение модели молниеотвода разрядом из искусственного облака заряженного водного аэрозоля:**  
*a* – фотография; *б* – развертка процесса поражения программируемой электронно-оптической камерой (размер кадра  $70 \times 70 \text{ см}^2$ , длительность экспозиции кадра 0,6 мкс, пауза между кадрами 0,2 мкс)

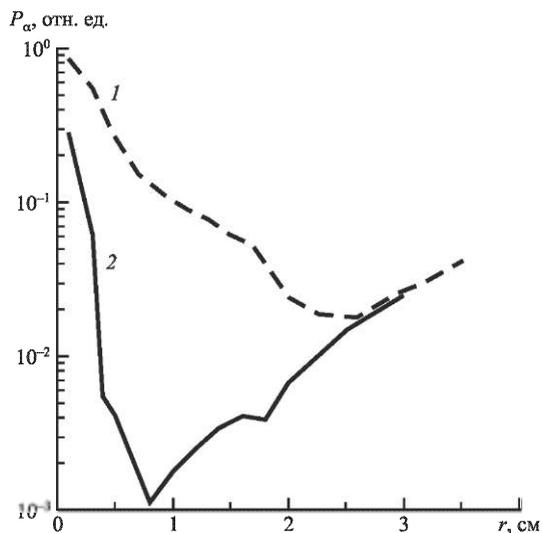
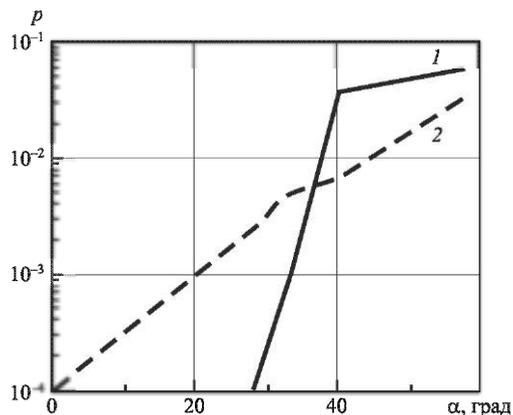


Рис. 9.29. Вероятность  $P_\alpha$  поражения модели сосредоточенного объекта (1) и модели фазного провода (2) разрядом из искусственного грозового облака при изменении радиуса  $r$  сферической вершины модели стержневого молниеотвода или радиуса  $r$  модели тросового молниеотвода



Рис. 9.30. Поражение моделей тросового молниеотвода и фазного провода разрядами из искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности

На основе проведенных экспериментов (около 10 тыс. разрядов) для модельной линии электропередачи зависимость вероятности поражения крайнего провода разрядом из искусственной грозовой ячейки от «угла защиты»  $\alpha$  грозозащитного троса показана на рис. 9.31 (кривая 1). Зависимость вероятности прорыва молнии через тросовую защиту к фазному проводу линии электропередачи, рассчитанная по эмпирическому соотношению (9.19) для линии в масштабе 1 : 100, представлена на этом рисунке кривой 2. Как видно, вероятность, полученная в эксперименте, существенно отличается от расчетной.



**Рис. 9.31. Зависимость поражения разрядом первого модельного фазного провода от угла защиты модельного грозозащитного троса**

Когда угол  $\alpha$  превышал  $28^\circ$ , в экспериментах наблюдалось резкое увеличение вероятности поражения разрядом из облака заряженного аэрозоля модельного фазного провода. Фактически, угол защиты  $25^\circ$ – $40^\circ$  является критическим с точки зрения резкого роста вероятности возникновения восходящих встречных разрядов на фазных проводах линии электропередачи. Возможно, в этом случае условия для старта восходящего искрового разряда с фазного провода создаются в момент, когда коронный разряд присутствует на грозозащитном тросе, экранируя его и задерживая момент возникновения восходящего разряда на грозозащитном тросе.

Таким образом, применение искусственных заряженных аэрозольных облаков открывает новые возможности для оценки вероятностей прорыва молнии в зоны защиты молниотводов.

## 9.8. Рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК) по молниезащите зданий и сооружений

В документах МЭК рекомендуется определять зоны защиты либо методом катящейся сферы радиусом  $R$ , либо определять эту зону через защитный угол  $\alpha$ . Для плоских крыш рекомендуются сеточные молниеприемники с регламентированными размерами ячеек сетки.

Метод катящейся сферы состоит в том, что вокруг защищаемого объекта перемещается расчетная сфера. Пространство между точками касания с объектом, сферой и поверхностью земли является защитной зоной. Наивысшие точки касания дают точки возможных ударов в объект, где, если требуется, могут устанавливаться молниеприемники.

Метод катящейся сферы приведен и в отечественном нормативном документе (называется методом фиктивной сферы). Там же приведен и метод защитного угла. Любые из приведенных методов определения защитных зон допускаются при проектировании отечественных объектов. Однако при проектировании объектов по контрактам с другими странами целесообразно использовать рекомендации МЭК.

Проанализируем рекомендации МЭК подробнее.

Радиус сферы  $R$  зависит от уровня защиты и от высоты защищаемого объекта (табл. 9.9 и на рис. 9.32). Метод защитного угла  $\alpha$  не используется при высотах молниеотвода, выходящих за кривые, приведенные на рис. 9.32. Если высота сооружения превышает указанные, то при определении защитных зон используется метод катящейся сферы. При высоте молниеотвода менее 2 м защитный угол не зависит от высоты молниеотвода.

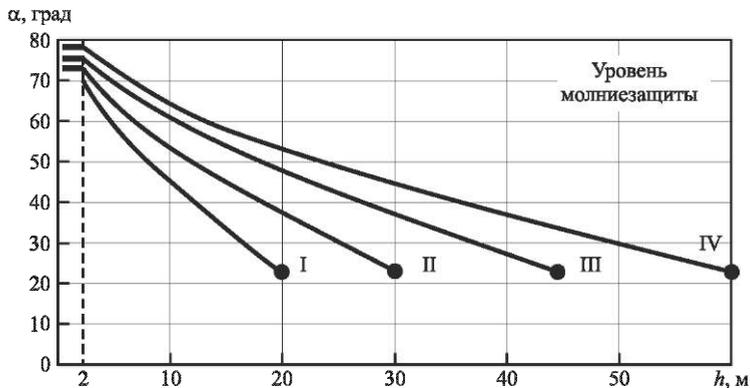


Рис. 9.32. Зависимости защитных углов от высоты молниеотвода при разных уровнях молниезащиты

Таблица 9.9

Радиус расчетной сферы  $R$  и размеры молниезащитной сетки при разных уровнях защиты

Уровень защиты	Радиус сферы $R$ , м	Размеры ячеек молниезащитной сетки, м · м
I	20	5 · 5
II	30	10 · 10
III	45	15 · 15
IV	60	20 · 20

На рис. 9.33–9.37 демонстрируется метод катящейся сферы. Перемещение сферы по объекту простейшей формы (рис. 9.33) дает разрез защитных зон, создаваемых самим объектом, и возможные точки удара молнии в верхнюю часть объекта. Защитными зонами является пространства между катящейся сферой и защищаемым объектом. Перемещение сферы по поверхности земли вокруг объекта позволяет найти площадь, ограниченную штрихпунктирной линией на рис. 9.34, которую можно использовать при расчетах числа ударов молнии в объект за грозовую сезон, используя плотность ударов молнии (число ударов в единицу площади). Как отмечалось ранее, эта плотность зависит от географического места, интенсивности грозовой деятельности и т.д.

Метод катящейся сферы для определения защитных зон в комплексе зданий продемонстрирован на рис. 9.35. Защитной зоной является пространство между катящейся сферой и защищаемым объектом. На рис. 9.36 приведен пример определения защитных зон и мест возможных ударов молнии (жирные линии).

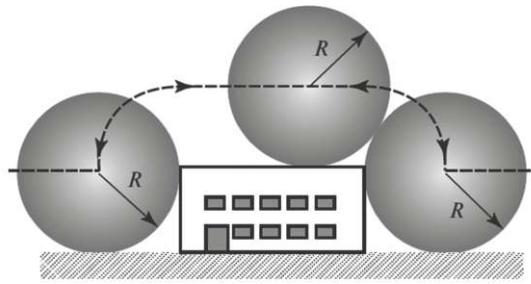


Рис. 9.33. Точки касания сферы и защищаемого объекта, в которые может ударить молния (вид сбоку)

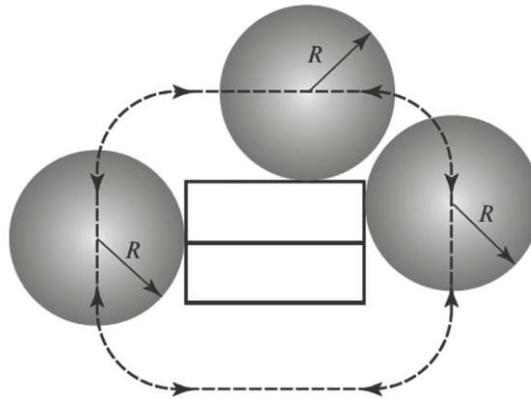


Рис. 9.34. Точки касания сферы и объекта (вид сверху)

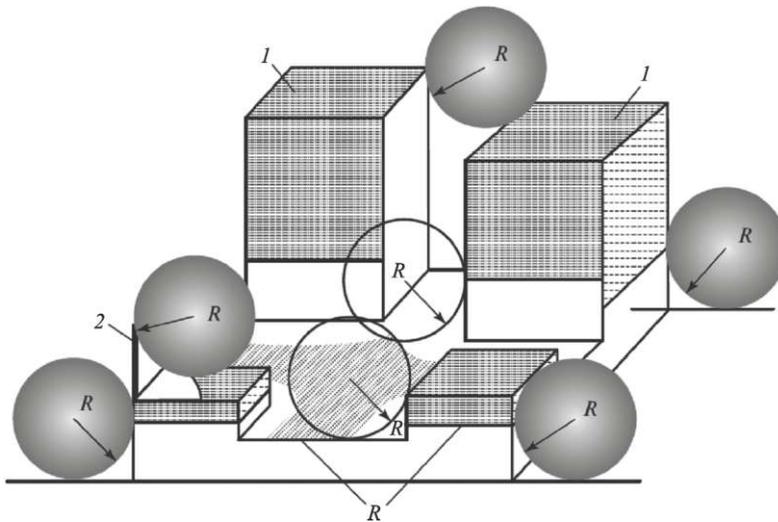


Рис. 9.35. Защитные зоны комплекса зданий, определяемые методом катящейся сферы:

1 – области, требующие защиты; 2 – мачта на здании;  $R$  – радиус сферы

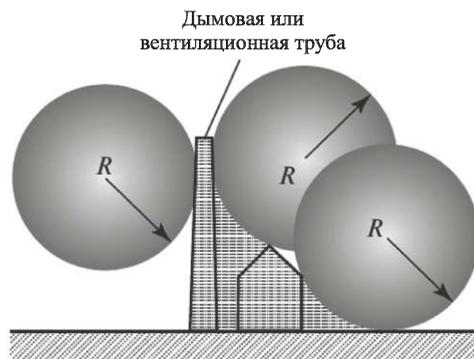


Рис. 9.36. Защитные зоны, полученные методом катящейся сферы

Если поверхность, на которой размещен молниеотвод, наклонная (рис. 9.37), то ось защитной зоны перпендикулярна поверхности. Вершина конуса защитной зоны совпадает с вершиной молниеотвода.

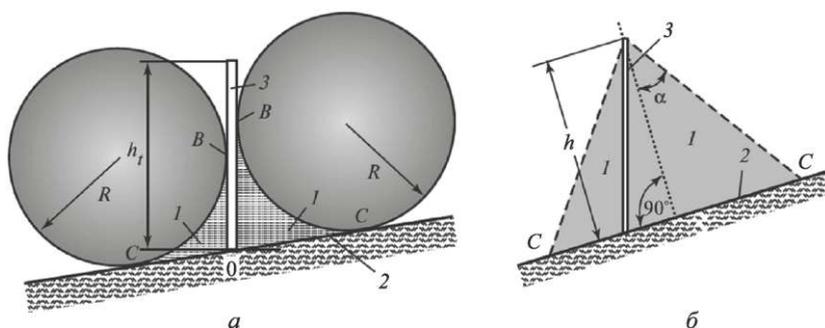
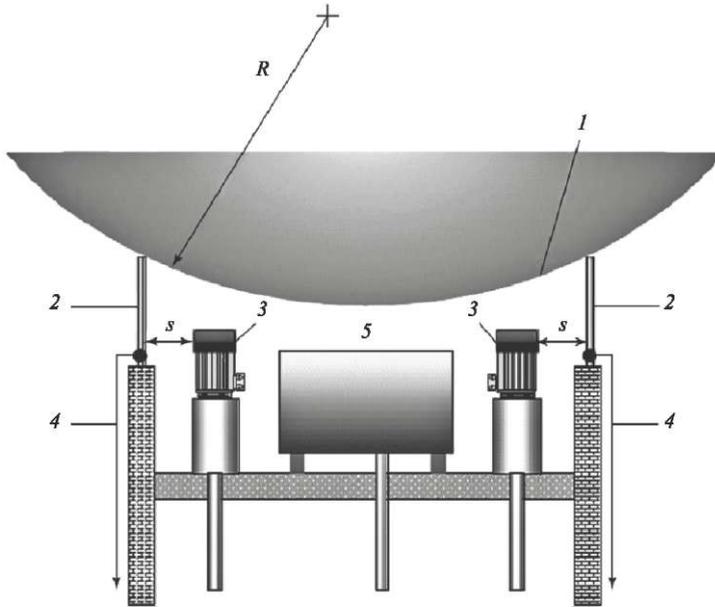


Рис. 9.37. Зона защиты стержневого молниеотвода, установленного на наклонной поверхности, определенная методом катящейся сферы:

*а* – метод катящейся сферы; *б* – границы зоны защиты; *I* – зона защиты; *2* – базовая плоскость; *3* – стержневой молниеотвод; *h* – расчетная высота стержневого молниеотвода;  $h_t$  – физическая высота стержневого молниеотвода;  $\alpha$  – защитный угол; *B*, *C* – точки соприкосновения катящейся сферы с молниеотводом и базовой плоскостью; *C* – границы защищаемой области

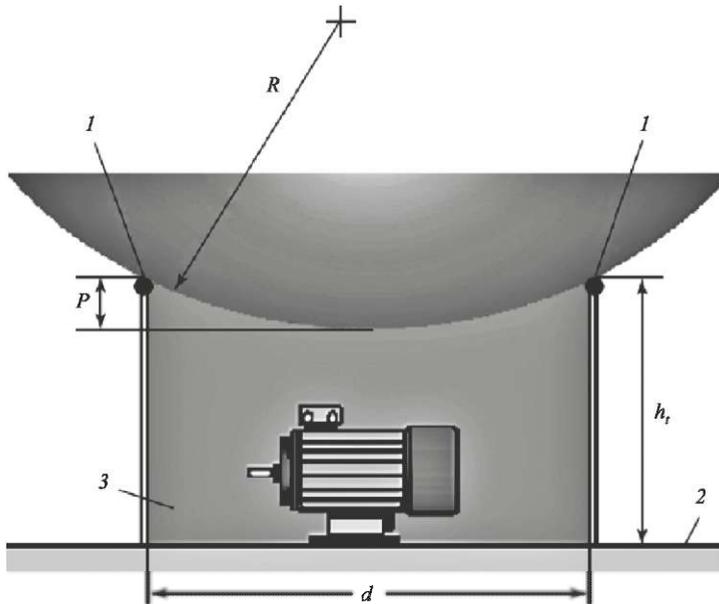
Защитная зона между двумя стержневыми или тросовыми молниеотводами определяется методом катящейся сферы согласно рис. 9.38 и 9.39. Метод катящихся сфер, ранее называвшийся электрогеометрическим, в 30-е годы прошлого столетия предусматривал аналитическую зависимость радиуса сферы  $R$  от максимального тока молнии. Однако в настоящее время радиус сферы выбирается в зависимости от уровня защиты по табл. 9.9.

Молниеотводы, отдельно стоящие (рис. 9.40) и установленные на крыше (рис. 9.41) характеризуются защитным углом. Удовлетворительная молниезащита достигается комбинацией вертикальных и горизонтальных молниеотводов (рис. 9.42), стержневых и сетчатых молниеотводов (рис. 9.43).



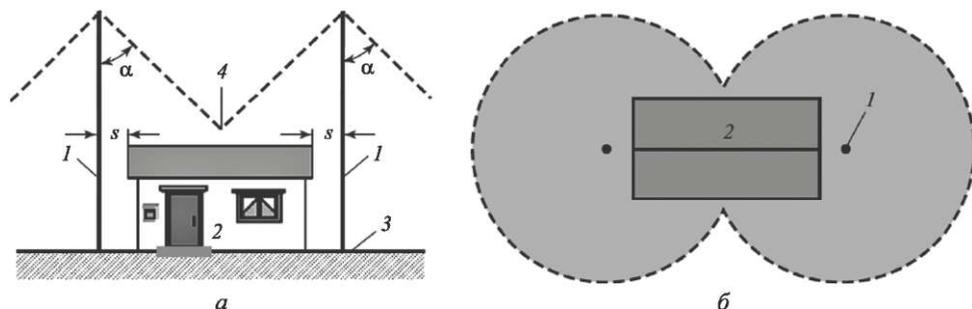
**Рис. 9.38. Защита от прямых ударов молнии объектов, расположенных на крыше, с помощью вертикальных молниеприемников:**

*1* – катящаяся сфера радиусом  $R$  для определения защитных зон; *2* – стержневые молниеприемники; *3* – электротехническое оборудование; *4* – спуски; *5* – металлический резервуар;  $s$  – расстояние между электрооборудованием и молниеприемником или спуском



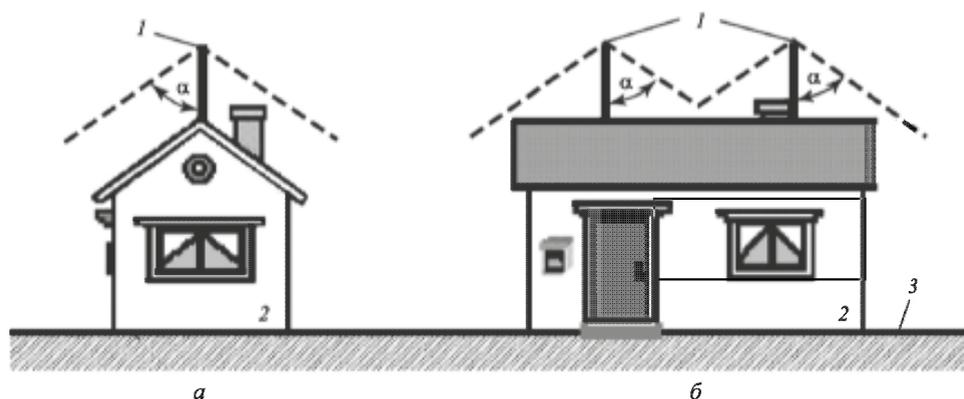
**Рис. 9.39. Защитная зона двух горизонтальных молниеотводов, определенная методом катящейся сферы ( $R > h_t$ ):**

*1* – горизонтальные провода; *2* – базовая плоскость; *3* – зона защиты;  
 $h_t$  – физическая высота молниеотводов над базовой плоскостью;  $p$  – провисание сферы;  
 $R$  – радиус сферы;  $d$  – расстояние между молниеотводами



**Рис. 9.40. Система молниезащиты с двумя отдельно стоящими молниеотводами и зона защиты, определенная с помощью метода защитного угла:**

*a* – вертикальная проекция; *б* – горизонтальная проекция; *1* – мачта молниеотвода; *2* – защищаемый объект; *3* – земля (базовая поверхность); *4* – пересечение защитных зон; *s* – наименьшее расстояние между молниеотводом и защищаемым объектом;  $\alpha$  – защитный угол



**Рис. 9.41. Пример выполнения системы молниезащиты стержневыми молниеотводами, установленными на защищаемом объекте:**

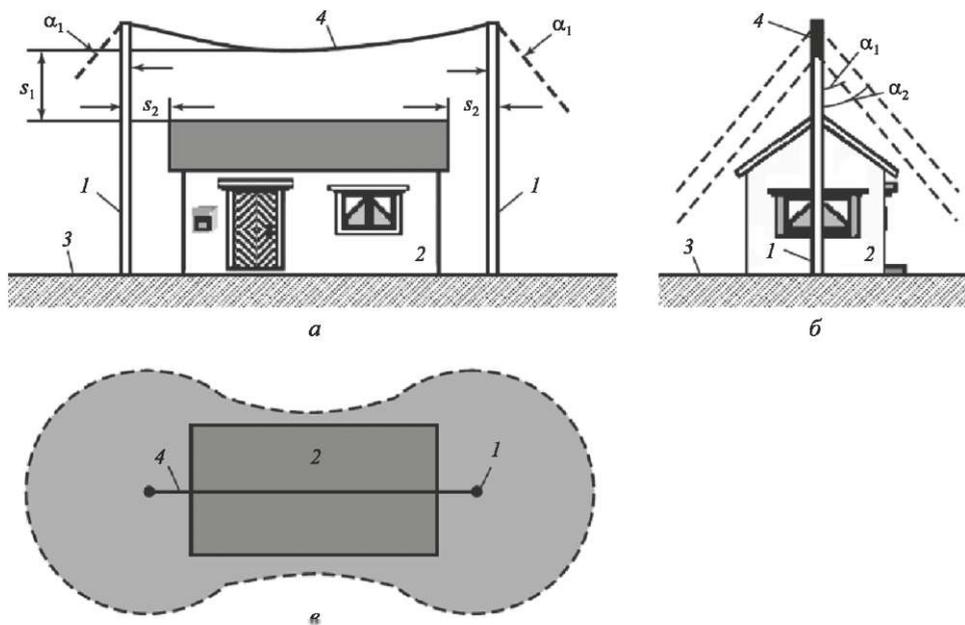
*1* – стержневые молниеотводы; *2* – защищаемый объект; *3* – базовая плоскость;  $\alpha$  – защитный угол

На рис. 9.43 и 9.44 показан пример установки стержневых молниеотводов на крыше. Защитный угол (рис. 9.44) определяется высотой молниеприемника  $h_1$  над защищаемой поверхностью (базовая поверхность – крыша); защитный угол  $\alpha_2$  определяется суммой высот молниеприемника относительно крыши  $h_1$  и высоты здания  $H$ :  $h_2 = h_1 + H$  (базовая поверхность – земля).

Молниеприемники, горизонтально установленные над проводящей крышей, показаны на рис. 9.45. В этом случае катящаяся сфера радиусом  $R$  должна быть выше выступов на крыше (превышение обозначено буквой *a*).

Молниеотвод в виде горизонтального проводника, установленного выше конька крыши, показан на рис. 9.46. Защищаемый объект должен полностью находиться в защитной зоне, определяемой защитным углом.

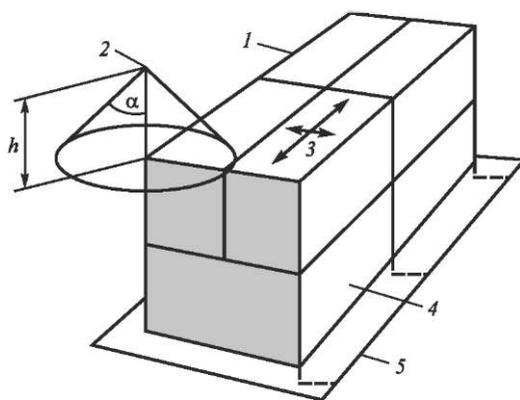
Как отечественные нормативные документы, так и рекомендации МЭК допускают использование металлических крыш, трубопроводов в качестве молниеприемников. При этом документы МЭК ставят следующие условия.



**Рис. 9.42. Внешняя система молниезащиты с использованием**

**двух стержневых молниеотводов и соединяющего их тросового молниеотвода:**

*a, б* – вертикальные проекции; *в* – горизонтальная проекция на базовую плоскость; *1* – стержневые молниеотводы; *2* – защищаемый объект; *3* – зона защиты на базовой поверхности; *4* – тросовый молниеотвод;  $s_1, s_2$  – наименьшие расстояния между молниеотводом и защищаемым объектом;  $\alpha_1$  – защитный угол возле стержневого молниеотвода;  $\alpha_2$  – защитный угол в середине между стержневыми молниеотводами



**Рис. 9.43. Система молниезащиты здания с установленными на крыше стержневым и сетчатым молниеприемниками:**

*1* – протяженный молниеприемник; *2* – стержневой молниеприемник;  
*3* – размеры сетки; *4* – спуск; *5* – заземлитель;  
*h* – высота стержневого молниеприемника;  
 $\alpha$  – защитный угол

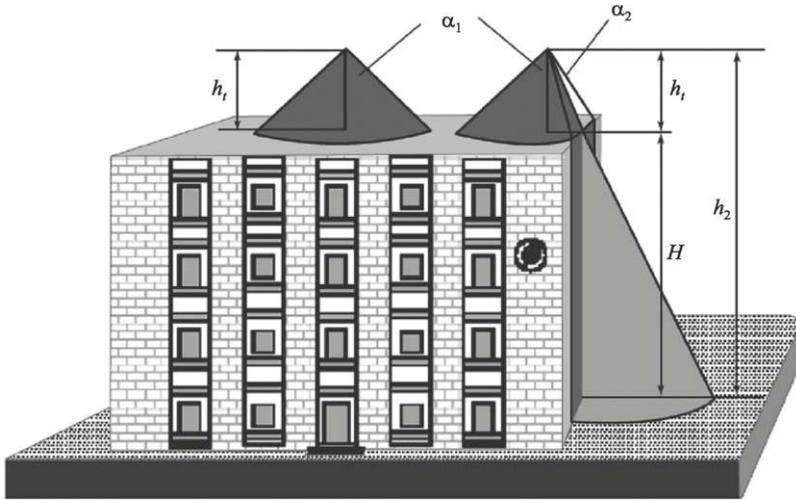


Рис. 9.44. К определению защитных углов для объектов с расположенными на крыше молниеприемниками

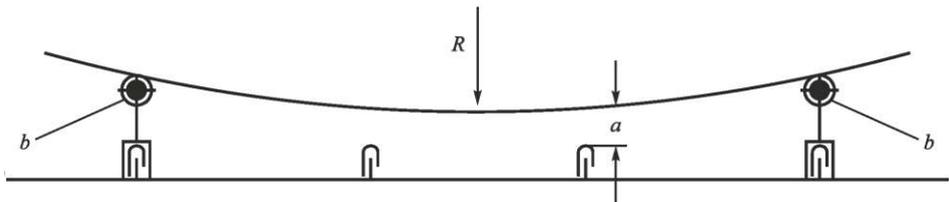


Рис. 9.45. Система молниеприемников на крыше с проводящим покрытием, в котором не допускается появления отверстий:

$R$  – радиус катящейся сферы;  
 $a$  – расстояние от сферы до выступа;  $b$  – молниеприемники

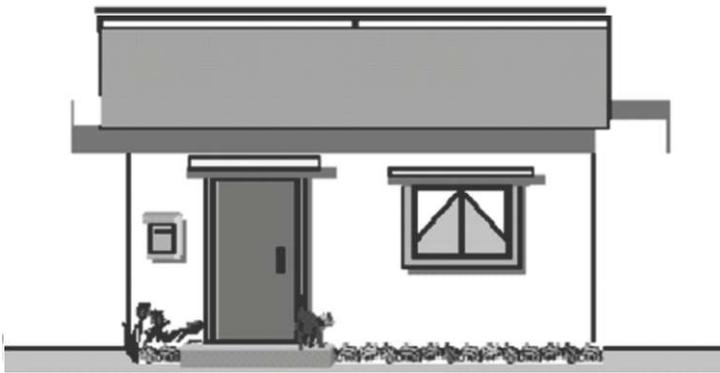
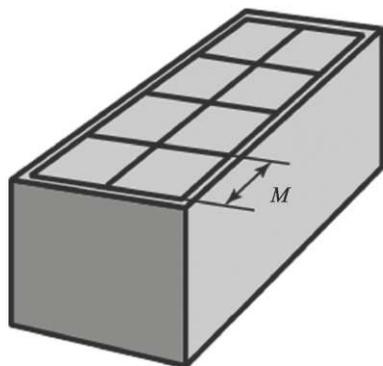
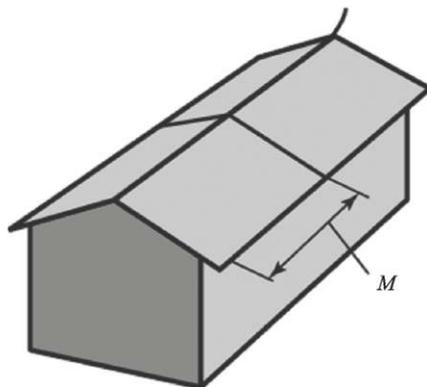


Рис. 9.46. Пример выполнения системы молниезащиты с помощью тросового молниеотвода, установленного на защищаемом объекте

Примеры молниеприемников в виде сеток, устанавливаемых на крышах, приведены на рис. 9.47 и 9.48. Размер ячейки  $M$  выбирается по табл. 9.9 в зависимости от уровня защиты. В этом случае для III уровня защиты дается  $M = 15 \times 15 \text{ м}^2$ .



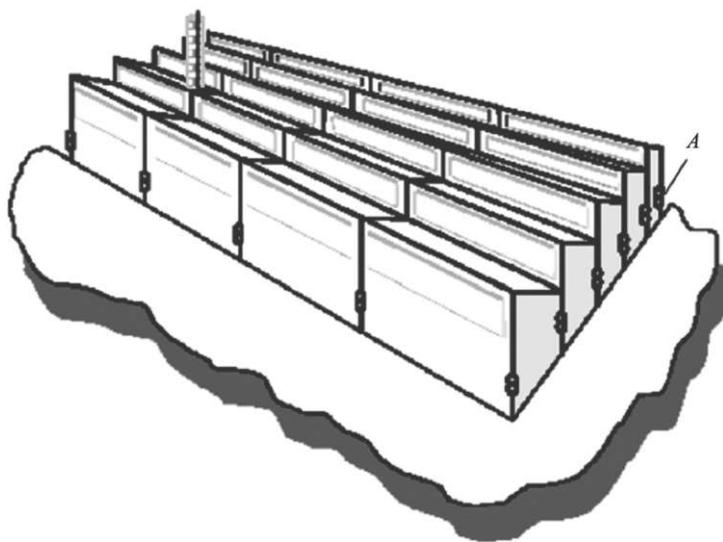
**Рис. 9.47. Молниезащитная сетка на плоской крыше здания:**  
 $M$  – размер ячейки сетки



**Рис. 9.48. Защита здания с двухскатной крышей**

Минимальная толщина металлического листа или трубы: из стали – 4 мм, если не допускается возникновение отверстий, 0,5 мм – если допускается; из меди – 5 и 0,5 мм; из алюминия – 7 и 0,6 мм соответственно.

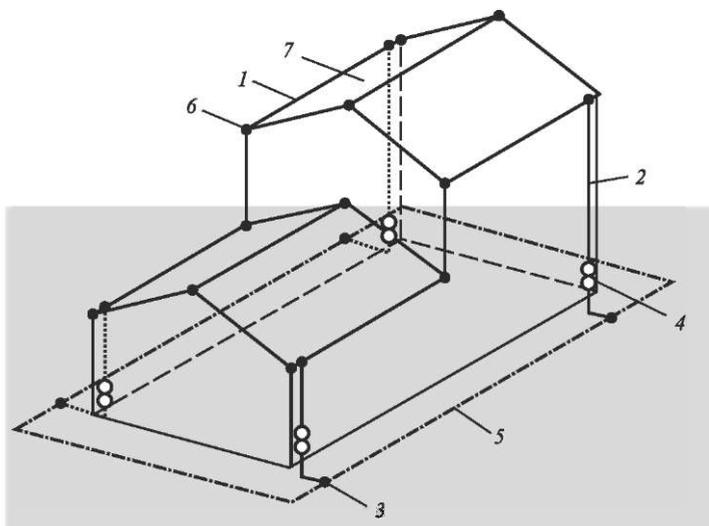
Рассмотрим выполнение внешней части молниезащиты – спусков от молниеприемника до заземлителя. На рис. 9.49 показана система молниезащиты здания со ступенчатой крышей с несколькими спусками, по которым распределяется ток молнии при ударе в стержневой молниеотвод или молниеприемники на кромках крыши.



**Рис. 9.49. Молниезащита здания со ступенчатой крышей:**  
 $A$  – контрольные точки

Внешняя часть системы молниезащиты должна содержать контрольные точки для проверки соединений с заземлителем и для измерения сопротивления растекания самого заземлителя. Контрольные точки, размещенные на системе молниезащиты, обозначены и на других рисунках.

Внешние части систем молниезащиты зданий других конфигураций показаны на рис. 9.50–9.52.



**Рис. 9.50. Внешняя часть системы молниезащиты здания из изоляционных материалов со ступенчатой крышей:**

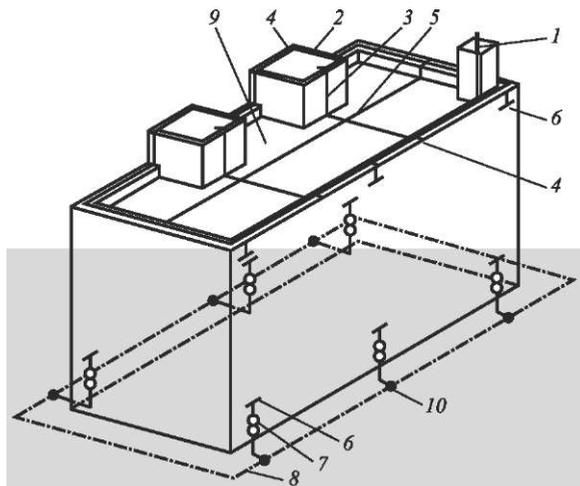
1 – горизонтальный молниеприемник; 2 – спуск; 3 – коррозионно-стойкое соединение с заземлителем; 4 – контрольная точка; 5 – кольцевой проводник заземлителя; 6 – соединения на углах системы молниезащиты; 7 – сетка со стандартными размерами

Типичные расстояния между точками присоединения спусков к кольцевому электроду заземлителя составляют 10 м для I и II защитных уровней, 15 м для III уровня и 20 м – для IV. В любом случае должно быть не менее двух спусков. Допускается скрутка вертикальных соединительных проводников. Длина скрутки должна быть не менее 20-кратного диаметра проводника.

Активное сопротивление цепи с использованием в качестве спусков арматуры железобетона (рис. 9.51) должно быть не менее 0,2 Ом. Примеры выполнения внутренних спусков в промышленных сооружениях приведены на рис. 9.53.

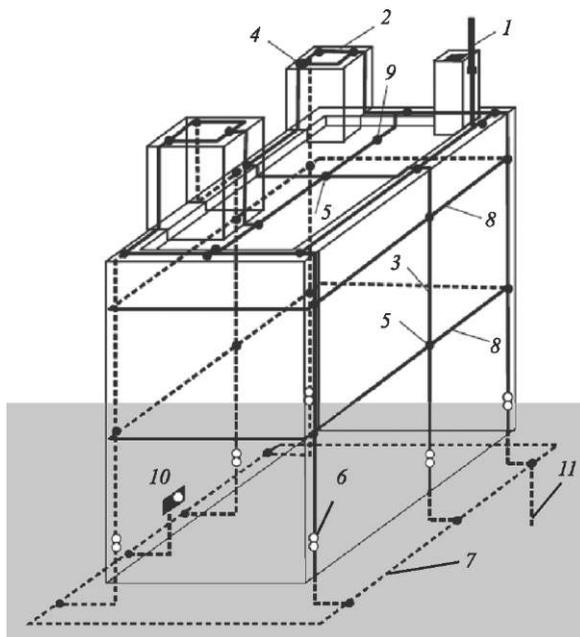
На рис. 9.54 показана система молниезащиты здания с укрепленной на молниевыводе телевизионной антенной, на рис. 9.55 – система молниезащиты с использованием фундаментного заземлителя. На рис. 9.56 приведен пример использования металлических элементов здания в системе молниезащиты. Так, металлический парапет может служить молниеприемником, а металлические балки каркаса здания – спуском.

На рис. 9.57а, б приведены примеры фиксации спусков на черепичной крыше и кирпичной трубе, а на рис. 9.58в, г – к водостоку и к водосточной трубе. Характерные расстояния:  $a = 1$  м;  $b = 0,15$  м;  $c = 1$  м;  $d$  – по месту;  $l = 0,2$  м;  $f = 0,3$  м;  $g = 1$  м;  $h = 0,05$  м;  $x = 0,3$  м;  $i = 1,5$  м;  $k = 0,5$  м.



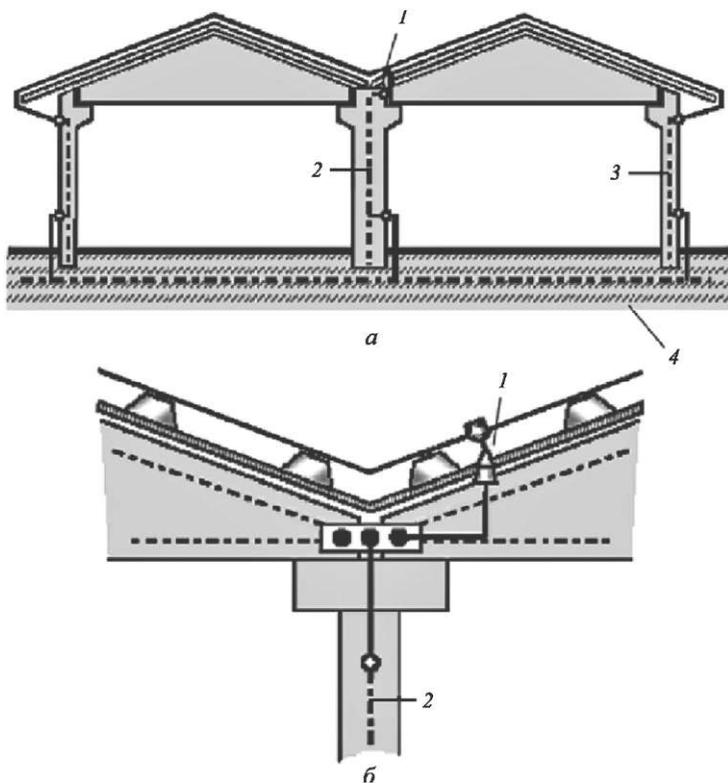
**Рис. 9.51. Система молниезащиты здания из железобетона с использованием стен в качестве естественных элементов системы:**

1 – стержневой молниеприемник; 2 – горизонтальный молниеприемник; 3 – спуск; 4 – соединения горизонтальных молниеприемников; 5 – крестообразное соединение; 6 – соединения с арматурой стен; 7 – контрольные точки; 8 – кольцевой контур заземления; 9 – плоская крыша; 10 – коррозионно-стойкие соединения в контуре заземления



**Рис. 9.52. Система молниезащиты деревянного или кирпичного здания высотой до 60 м с плоской крышей:**

1 – стержневой молниеприемник; 2 – горизонтальные молниеприемники; 3 – спуск; 4 – соединительные точки; 5 – крестообразные соединения; 6 – контрольные точки; 7 – кольцевой контур заземления; 8 – кольцевой контур выравнивания потенциалов; 9 – крепление системы молниезащиты на крыше; 10 – место присоединения шины выравнивания потенциалов внутри здания; 11 – вертикальный электрод заземлителя



**Рис. 9.53. Внутренние спуски в промышленных сооружениях:**

*а* – в стенах; *б* – под крышей; 1 – проводник системы молниезащиты с водонепроницаемым вводом; 2 – стальная арматура колонны; 3 – стальная арматура стен; 4 – проводник заземлителя в фундаменте

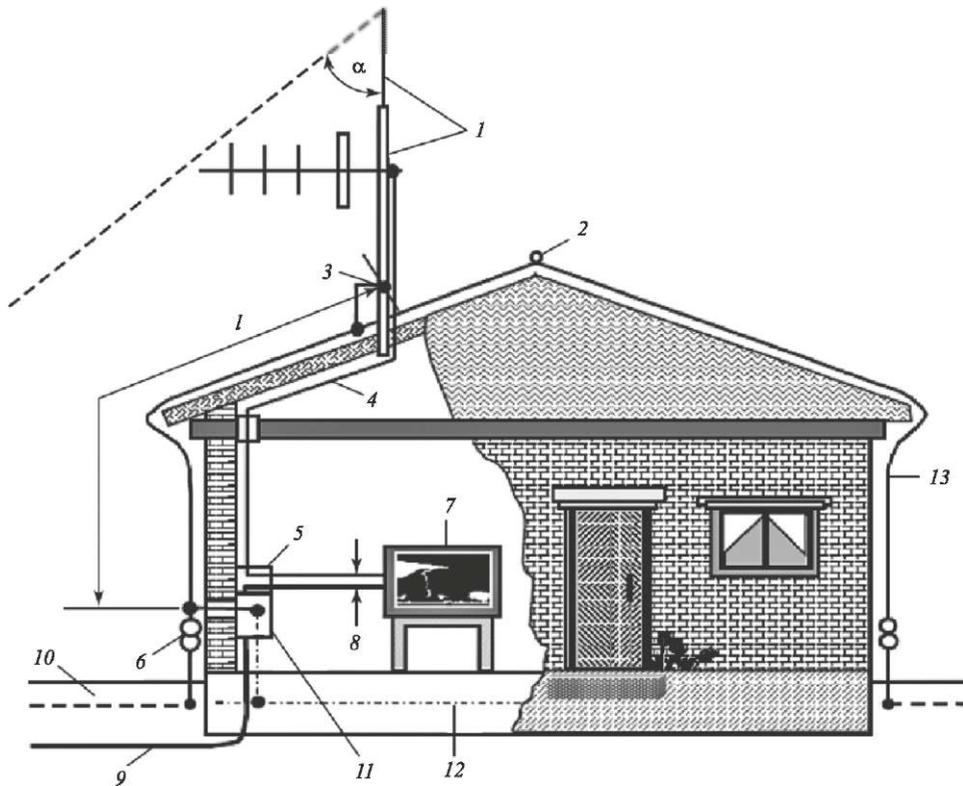
Типичные конфигурации внешней части систем молниезащиты зданий приведены на рис. 9.58. Они представляют собой сетки проводников, объединенных во многих точках. Сетка имеет достаточное число контрольных точек.

Иногда систему молниезащиты выполняют скрытой под крышей, как показано на рис. 9.59. Спуски в консольной части здания выполняются согласно рис. 9.60. при этом принимается высота человека с поднятой рукой 2,5 м, а безопасное расстояние  $s$  определяется по падению напряжения на участке  $l$  спуска в консольной части здания, с учетом того, что по спуску протекает часть тока молнии, обратно пропорциональная количеству спусков.

На рис. 9.61–9.63 показаны типичные примеры защиты оборудования, находящегося в защитных зонах  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  и  $l$ . Иногда используется молниеприемник в виде шляпки (рис. 9.64). Использование в качестве молниеприемника патрубка, выходящего из крыши здания, показано на рис. 9.65. В этом случае патрубок может быть соединен с горизонтальным молниеприемником. Обязательным является его соединение с системой выравнивания потенциалов.

Неотъемлемой частью системы молниезащиты является заземлитель. Он обычно представляет собой комбинацию параллельно объединенных заземлителей зданий, сооружений. Объединение реализуется, как правило, сетками, проложенными на территории предприятия. На электроэнергетических предприятиях сопротивление

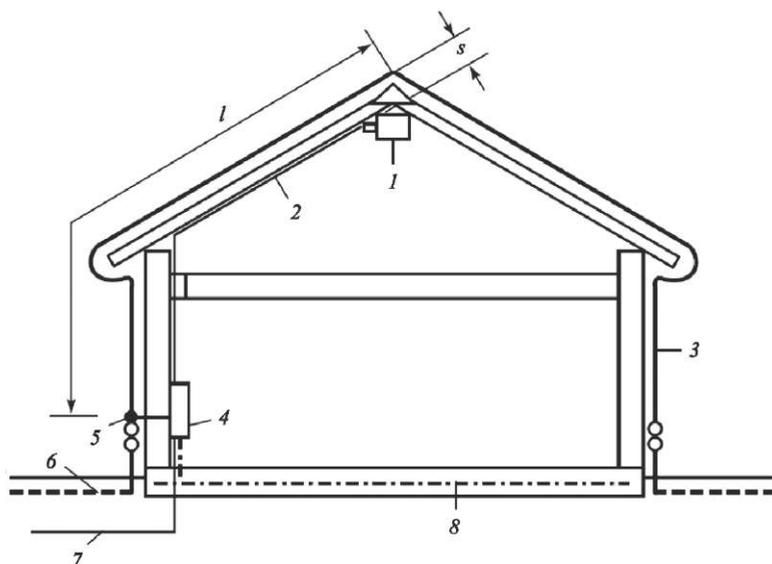
заземлителя нормируется. Для подстанций, распределительных устройств сопротивление заземлителя не должно превышать 0,5 Ом. Если расчетное сопротивление сеточно-го заземлителя с учетом естественных элементов превышает указанное значение, то сеточный заземлитель дополняется вертикальными стержнями. Существуют достаточно полные рекомендации по расчетам заземлителя, измерениям его сопротивления, диагностике и обслуживанию. Некоторые из них содержатся в ПУЭ, различных руководящих документах и инструкциях, например МЭК.



**Рис. 9.54. Молниезащита здания с телевизионной антенной, укрепленной на молниеотводе:**

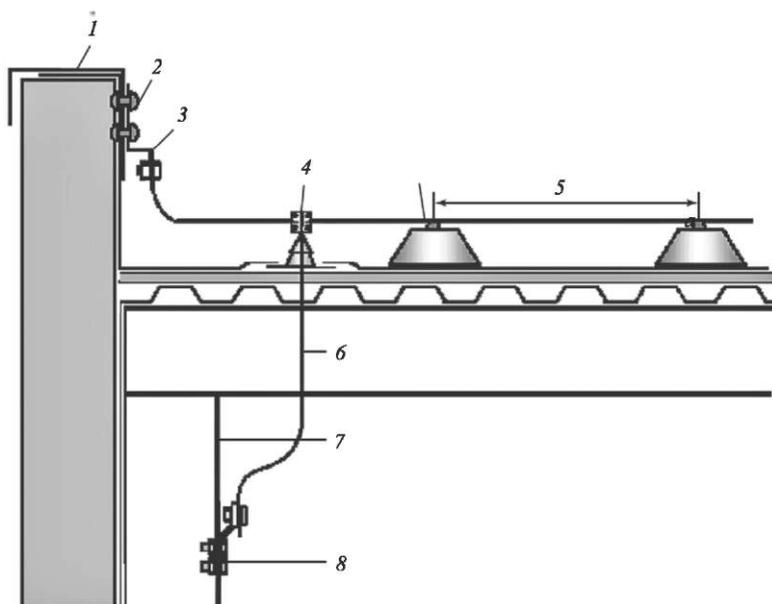
1 – металлическая мачта; 2 – горизонтальный молниеприемник на коньке крыши; 3 – соединение мачты с металлическим спуском; 4 – кабель антенны; 5 – основная шина (оболочка кабеля антенны соединена с основной шиной); 6 – контрольная точка; 7 – телевизионное оборудование; 8 – параллельная прокладка кабеля антенны и силовых проводов питания телевизионного оборудования; 9 – кабель электропитания; 10 – система заземления; 11 – распределительный щит с защитным устройством; 12 – проводник заземлителя фундамента; 13 – спуск системы молниезащиты;  $l$  – расстояние между точками присоединения к системе молниезащиты;  $\alpha$  – защитный угол

На рис. 9.66 и 9.67 показаны примеры выполнения присоединений к простейшим вертикальным стержневым заземлителям, рекомендованные МЭК. В заземлителе, показанном на рис. 9.66, вертикальный электрод, забиваемый в грунт, состоит из коротких стержней, имеющих хороший контакт при их соединении. Короткие стержни облегчают забивание электродов. При необходимости верхняя часть электрода может быть удалена после забивания. Пример вертикального составного заземлителя показан на рис. 9.67.



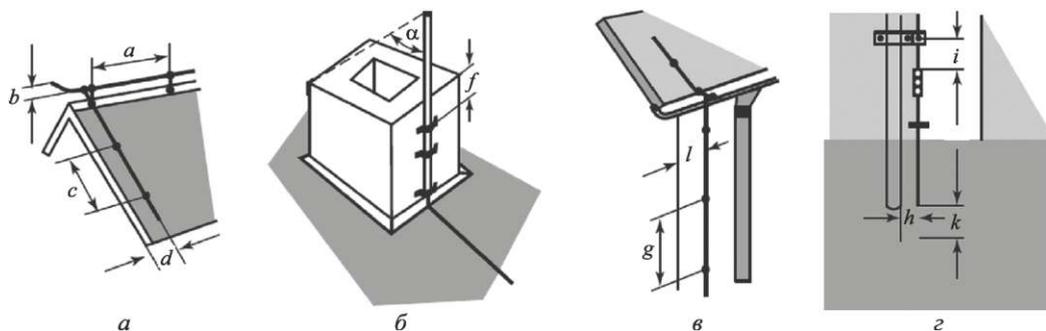
**Рис. 9.55. Система молниезащиты с двумя спусками и с использованием в качестве заземлителя арматуры фундамента:**

*1* – электротехническое оборудование; *2* – электропроводка; *3* – шины системы молниезащиты; *4* – распределительный щит с защитным устройством; *5* – контрольные точки; *6* – заземлитель; *7* – силовой кабель; *8* – арматура фундамента; *s* – расстояние между шинами системы молниезащиты и электропроводкой; *l* – длина спуска



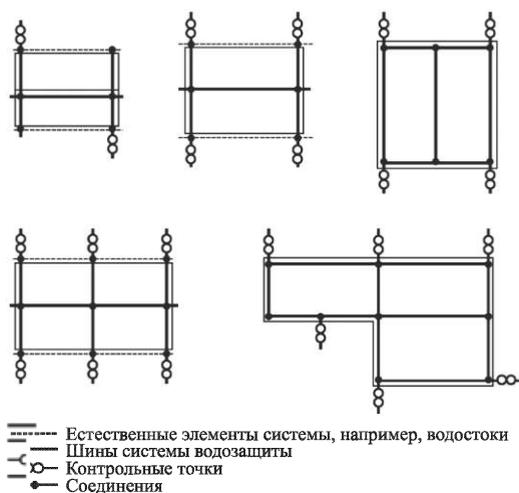
**Рис. 9.56. Система молниезащиты с использованием металлических элементов крыши здания:**

*1* – парапет крыши; *2* – гибкий проводник; *3* – соединение горизонтального молниеприемника с парапетом; *4* – соединение горизонтального молниеприемника с проводником спуска; *5* – крепление молниеприемника; *6* – водонепроницаемый ввод спуска вовнутрь помещения; *7* – стальная балка; *8* – соединение

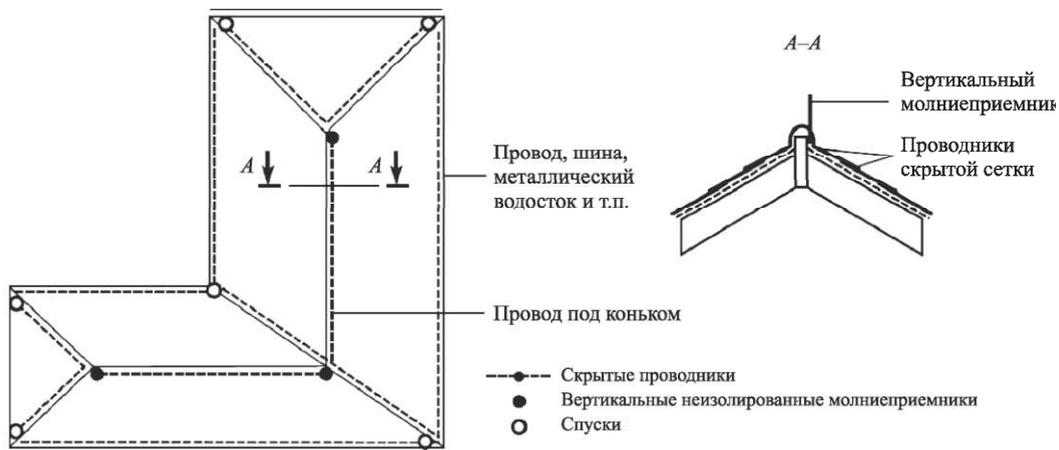


**Рис. 9.57. Молниезащита зданий с черепичными крышами:**

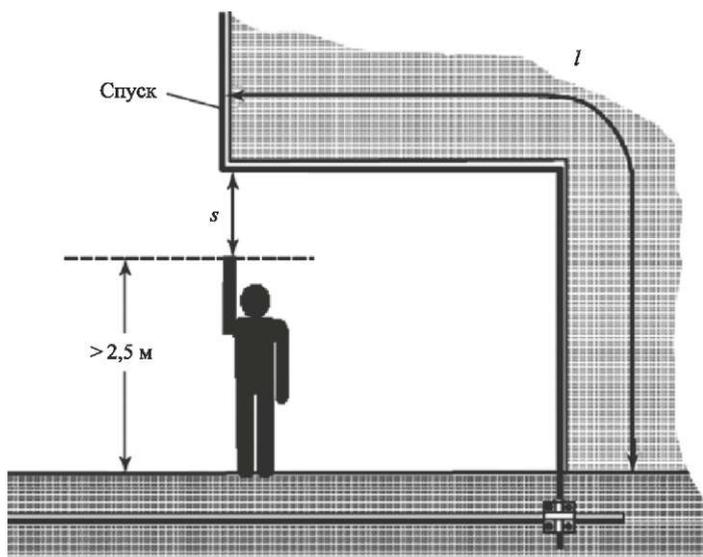
*a* – молниеприемник над коньком; *б* – молниеприемник для защиты вытяжной трубы, дымохода; *в* – спуск с присоединением к металлическому водостоку; *z* – спуск с контрольными точками и присоединением к металлической водосточной трубе



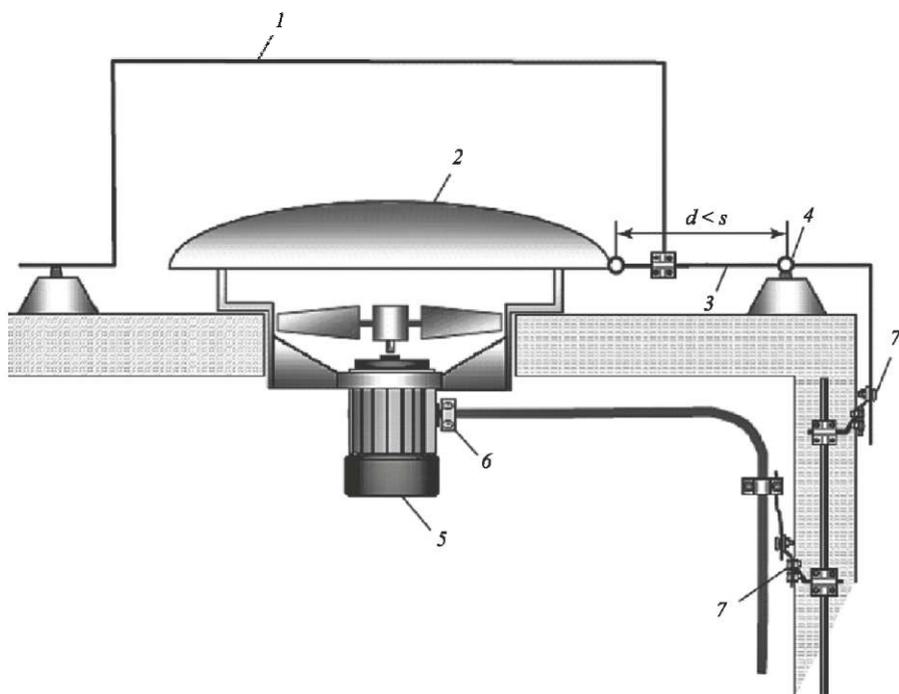
**Рис. 9.58. Типичные конфигурации внешней части системы молниезащиты**



**Рис. 9.59. Скрытая система молниезащиты с дополнительными вертикальными молниеприемниками**

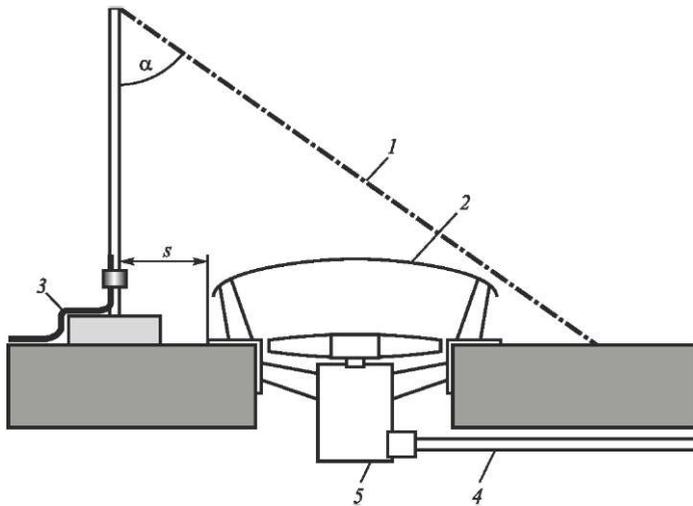


**Рис. 9.60. Молниезащита в консольной части здания:**  
 $s$  – безопасное изоляционное расстояние;  $l$  – расчетная длина спуска



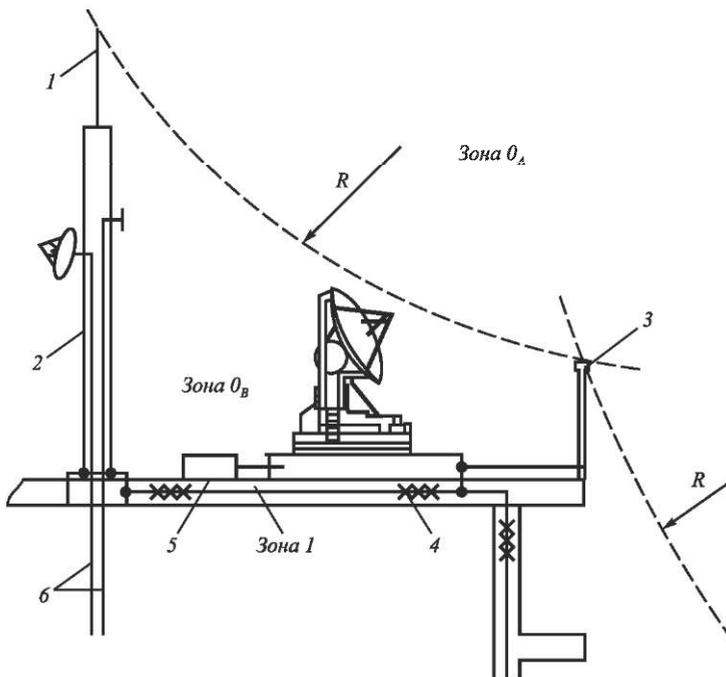
**Рис. 9.61. Защита электротехнического оборудования, установленного на крыше и присоединенного к молниеприемнику, от прямых ударов молнии:**

$1$  – молниеприемник;  $2$  – кожух из изоляционного материала;  $3$  – соединительный проводник;  $4$  – горизонтальный молниеприемник;  $5$  – электротехническое оборудование;  $6$  – клеммник для присоединения провода электропитания;  $7$  – точка соединения проводящих элементов здания;  $d$  – расстояние между изоляционным кожухом и молниеприемником;  $s$  – изоляционное расстояние



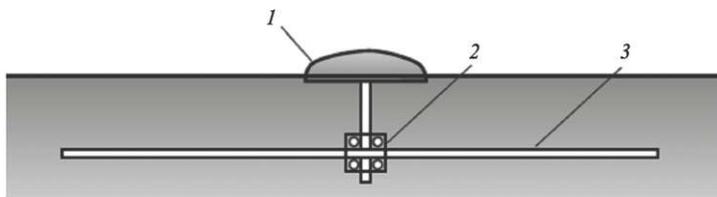
**Рис. 9.62. Стержневой молниеприемник для защиты металлической крыши, устанавливаемый рядом с электротехническим оборудованием, не присоединенным к молниеприемнику:**

*1* – защитный конус; *2* – крешение металлических элементов крыши; *3* – горизонтальный молниеприемник; *4* – силовая электропроводка в экране; *5* – электротехническое оборудование; *s* – изоляционное расстояние;  $\alpha$  – защитный угол

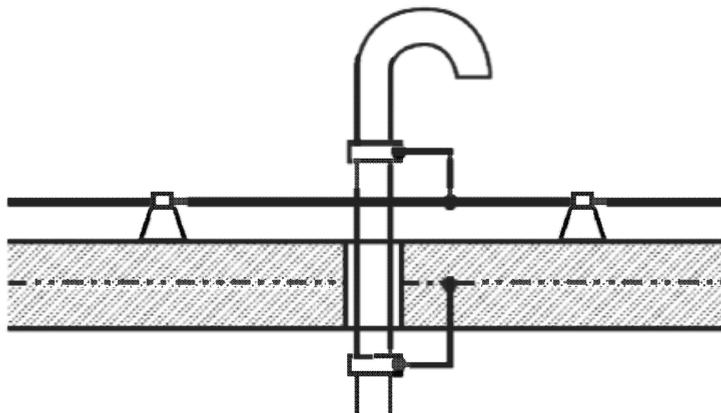


**Рис. 9.63. Защита антенн и другого внешнего оборудования:**

*1* – стержневой молниеотвод; *2* – стальная мачта антенны; *3* – защитный барьер; *4* – соединения арматуры железобетонных конструкций; *5* – защитное устройство на линии, идущей из зоны  $\theta_B$ ; *6* – линии (внутри мачты), идущие из зоны *1* и не требующие защитных устройств; *R* – радиус катящейся сферы

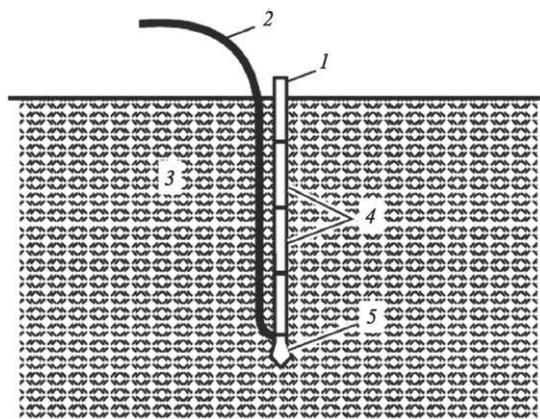


**Рис. 9.64. Молниеприемник в виде шляпки на крышах автомобильных парковок:**  
 1 – шляпка молниеприемника; 2 – стальные проводники для присоединений к арматуре;  
 3 – стальная арматура



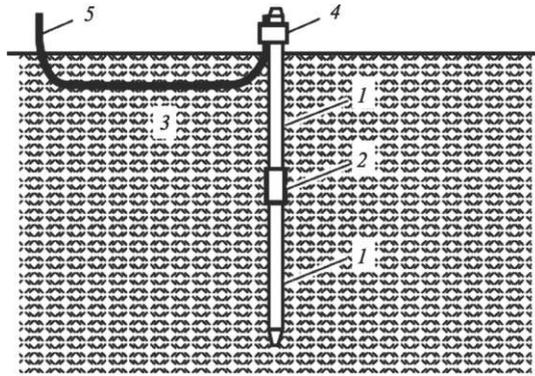
**Рис. 9.65. Присоединение естественных молниеприемников-патрубков к системе молниезащиты и к системе выравнивания потенциалов здания (в данном случае к арматуре железобетонного здания):**

1 – крепление молниеприемника; 2 – металлическая труба;  
 3 – горизонтальный молниеприемник; 4 – стальная арматура железобетона



**Рис. 9.66. Пример заземляющего устройства с вертикальным электродом и удаляемой при необходимости верхней частью:**

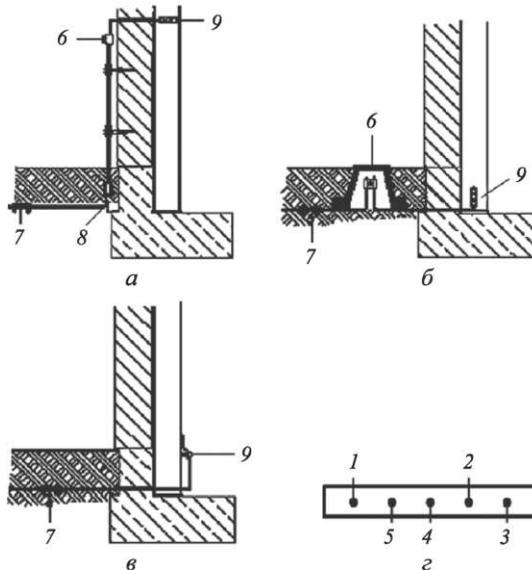
1 – удаляемая (при необходимости) верхняя часть вертикального электрода; 2 – шина, присоединяемая к заземляющему электроду (верхняя часть может иметь изоляционную оболочку); 3 – грунт; 4 – короткие участки заземляющего электрода, забитые в грунт; 5 – стальной направляющий наконечник



**Рис. 9.67. Пример вертикального заземлителя с соединительной муфтой:**

*1* – участки составного электрода; *2* – соединительная муфта; *3* – грунт;  
*4* – соединение шины *5* с электродом *1*; *5* – шина заземлителя

Как отмечалось, экран здания и заземлитель имеют контрольные точки для измерения параметров заземлителя и системы выравнивания потенциалов. Рекомендуемое МЭК размещение контрольных точек приведено на рис. 9.68. Контрольные точки следует располагать на внешней или внутренней стене здания или на полу. Заземлитель типа А на рис. 9.68 имеет не менее двух вертикальных электродов, типа В – наружным кольцевым проводником или с горизонтальной сеткой.



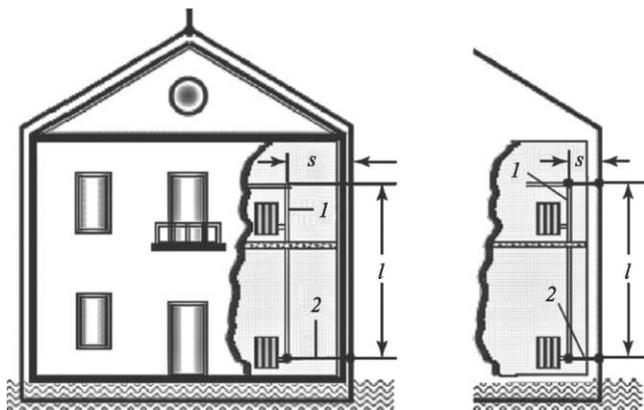
**Рис. 9.68. Варианты соединений системы молниезащиты и заземлителя с использованием естественных спусков и детали контрольных точек:**

*a* – контрольная точка на стене; *б* – контрольная точка на полу; *в* – с металлоконструкцией на наружной стороне стены; *z* – с использованием шины, расположенной в люках на полу рядом с помещением; *1* – спуск; *2* – присоединение к заземлителю типа А; *3* – шина присоединение к заземлителю типа В; *4* – присоединение к арматуре фундамента; *5* – шина связи с внутренней частью системы молниезащиты; *6* – контрольная точка на стене; *7* – коррозионно-стойкие присоединения типа Т к проводникам заземлителя в земле; *8* – коррозионно-стойкие присоединения в земле; *9* – соединения системы молниезащиты с металлоконструкцией

В здании с внешней молниезащитой предъявляются требования к размещению оборудования в помещениях. Безопасные расстояния  $s$  между системой молниезащиты и металлическими заземленными предметами внутри здания (рис. 9.69 и 9.70), как и расстояния  $s_1$  и  $s_2$  на рис. 9.42. Наименьшее расстояние

$$s \geq K_i \frac{K_c}{K_M} l, \quad (9.26)$$

где  $K_i$  – коэффициент, зависящий от уровня защиты;  $K_c$  – коэффициент, зависящий от тока, протекающего по ближайшему спуску или металлоконструкции;  $K_M$  – коэффициент, зависящий от изоляции;  $l$  – длина спуска от земли до точки определения расстояния.

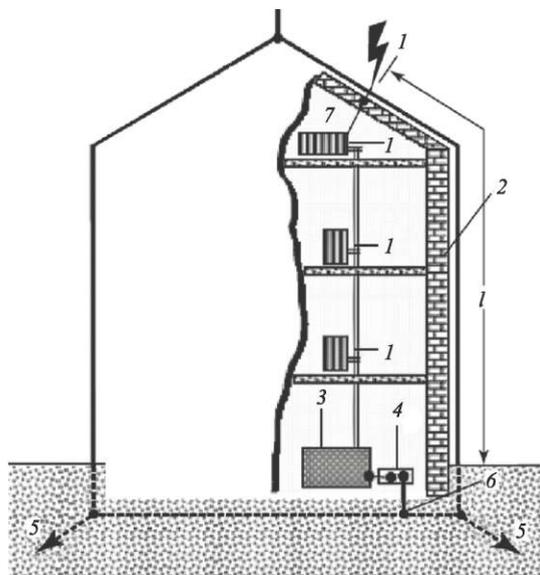


**Рис. 9.69. Безопасные расстояния  $l$  и  $s$  между системой молниезащиты и металлоконструкциями внутри здания:**

- a* – соединение металлических элементов  $l$  с шиной выравнивания потенциалов  $2$ ;
- б* – соединение металлических элементов  $l$  с шиной выравнивания потенциалов  $2$  и со спуском на наибольшем расстоянии от шины выравнивания потенциалов

**Рис. 9.70. К расчетам безопасного расстояния  $s$  для наибольшего расстояния  $l$  от шины выравнивания потенциалов:**

$l$  – металлический радиатор системы отопления;  $2$  – стена из кирпича или дерева;  $3$  – нагреватель;  $4$  – шина выравнивания потенциалов;  $5$  – заземлитель;  $6$  – соединение с заземлителем или спуском;  $7$  – наиболее опасная точка поражения



Для уровня I коэффициент  $K_i = 0,1$ , для уровня II  $K_i = 0,075$  и для уровней III и IV  $K_i = 0,05$ .

Значения коэффициента  $K_c$  зависят от числа проводников спуска. При одном проводнике  $K_c = 1$ , при двух –  $K_c = 0,66$ , а при четырех и более  $K_c = 0,44$ .

Для воздуха  $K_m = 1$ , для кирпича и бетона  $K_m = 0,5$ . При комбинированной изоляции принимается наименьшее значение  $K_m$ .

## 9.9. Вторичные воздействия молнии

### 9.9.1. Виды вторичных воздействий молнии

К вторичным воздействиям при ударах молнии в территорию энергообъекта относятся (рис. 9.71):

- воздействие на вторичное оборудование и системы связи импульсных магнитных полей от тока молнии;
- перекрытие с заземляющего устройства через грунт на контрольные кабели;
- перекрытие с поверхности земли на контрольные кабели;
- обратное перекрытие с молниеприемника на первичное оборудование;
- индуктированные импульсные перенапряжения во вторичных кабелях.

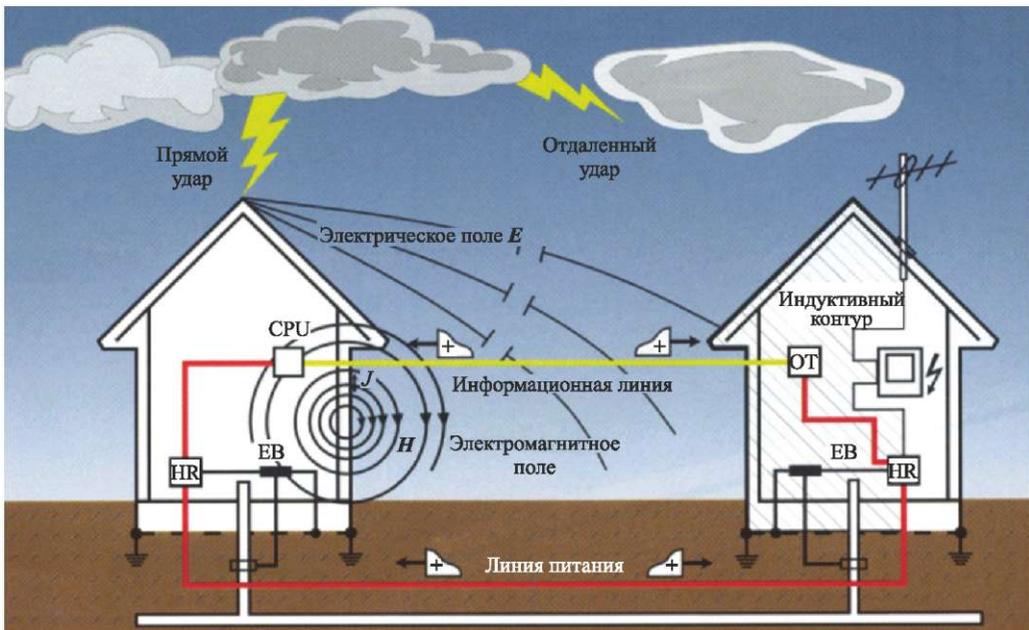


Рис. 9.71. Воздействия молнии на объект

Последствием вторичных воздействий молнии может быть:

- повреждение оборудования;
- нарушения функционирования систем управления, контроля и сигнализации;
- возникновение пожара;
- нарушение условий электробезопасности для персонала.

Электрические станции и подстанции – сложные объекты для молниезащиты. Они занимают, как правило, большую территорию, на которой располагаются здания различного назначения и высоковольтное оборудование. По территории энергообъектов прокладываются сотни кабельных линий по различным трассам. Общая протяженность контрольных кабелей может составлять десятки километров.

Был проведен анализа статистических данных по авариям в грозовой сезон за 25 лет на подстанциях и станциях крупнейшей в России энергосистемы. В эксплуатации этой энергосистемы находится примерно 700 подстанций напряжением 35–500 кВ и 30 электростанций. Общая площадь этих энергообъектов составляет более 3000 га. Грозовая активность в данном регионе составляет 40–60 часов в год. Расчетное значение количество ударов молнии в территорию энергообъектов составляет примерно 100 уд./год. За указанный период в энергосистеме не было зарегистрировано ни одного случая повреждения высоковольтного силового оборудования на подстанциях и станциях от прямых ударов молнии. Было зарегистрировано лишь нескольких случаев повреждения изоляторов шин высокого напряжения. За тот же период времени регулярно, примерно раз в 5 лет, происходили технологические нарушения и аварии из-за повреждения и неправильной работы систем релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Официально регистрировались лишь случаи с отключением потребителей электроэнергии. Примерно на порядок больше случаев повреждений систем видеонаблюдения, противопожарной сигнализации, других систем и устройств, которые не приводили к отключениям потребителей.

На энергообъектах в России, как правило, применяют открытые распределительные устройства (ОРУ). Молниезащита ОРУ осуществляется с помощью стержневых молниеотводов, установленных на отдельных мачтах и на порталах (рис. 9.72). Электрические станции и подстанции с закрытым (ЗРУ) и элегазовым (КРУЭ) распределительными устройствами составляют не более 5% от общего количества. Молниезащита зданий выполняется, как правило, с помощью сетки, расположенной на кровле (рис. 9.73).



**Рис. 9.72. Молниезащита ОРУ**

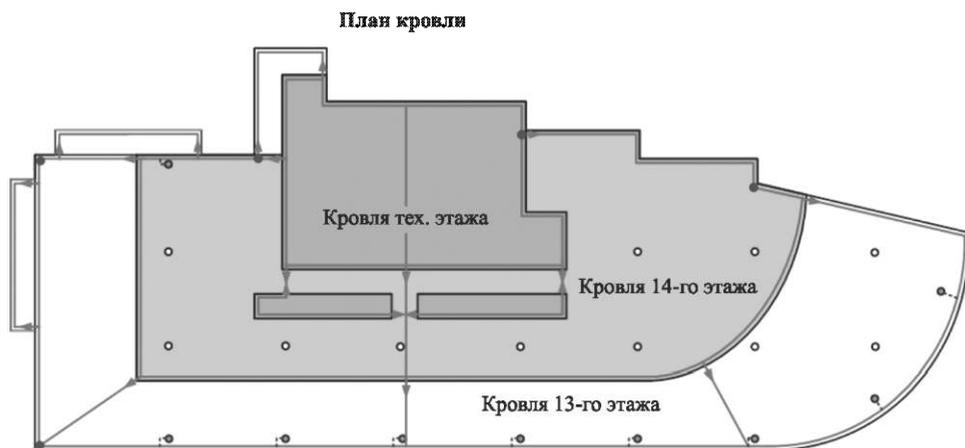


Рис. 9.73. Молниезащита зданий

### 9.9.2. Аварии и технологические нарушения из-за вторичных воздействий молнии

Анализ технологических нарушений и аварий при ударах молнии в молниеотводы позволил установить, что они происходили из-за вторичных воздействий молнии. Перенапряжения во вторичных цепях вызывают повреждения изоляции кабелей, устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, короткие замыкания в системах электропитания постоянного и переменного тока, и как следствие отключения потребителей электрической энергии. Рассмотрим несколько типичных случаев нарушений в работе энергообъектов из-за воздействий молнии на системы релейной защиты и противоаварийной автоматики. Следует отметить, что в этих случаях персоналом энергообъекта было установлено место удара молнии. Как правило, определить точно место удара молнии не удается.

**Обратное перекрытие с ЗУ на первичные цепи.** Подстанция представляет собой открытую подстанцию 110/10 кВ (рис. 9.74). На территории подстанции расположены ОРУ-110 кВ, КРУН-10 кВ и два трансформатора 110/10 кВ. Молниезащита подстанции осуществляется при помощи трех стержневых молниеприемников, расположенных на поргалах. В апреле 2010 года был зафиксирован прямой удар молнии в территорию подстанции. В результате были повреждены ввод фазы В 110 кВ и разрядник нейтрали трансформатора Т-2 (рис. 9.75).

В результате проведенных измерений и расчетов установлено, что расчетные значения импульсного сопротивления заземляющего устройства подстанции составляет 13,2 Ом. При ударах молнии в поргальные молниеприемники  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  импульсные напряжения между металлоконструкциями оборудования и ошиновкой 110 кВ подстанции могут составлять до 1300 кВ. Это достаточно для возникновения обратных перекрытий с заземленных металлоконструкций оборудования на ошиновку подстанции и повреждения оборудования подстанции.

**Обратное перекрытие с ЗУ на вторичные цепи.** Персонал подстанции наблюдал удар молнии в молниеотвод, расположенный вблизи ОРУ-110кВ (рис. 9.76). Молниеотвод имел соединение с заземляющим устройством ОРУ. Вынос высокого потенциала с молниеотвода по заземляющему проводнику привел к повреждению изоляции кабеля,

по которому, подавалось питание постоянным током к приводу выключателя. Из-за перенапряжений в сети постоянного тока произошло повреждение устройств релейной защиты и ложное отключение 8 выключателей 110 кВ и 2 выключателей 220 кВ.



Рис. 9.74. Повреждение оборудования ПС при ударе молнии

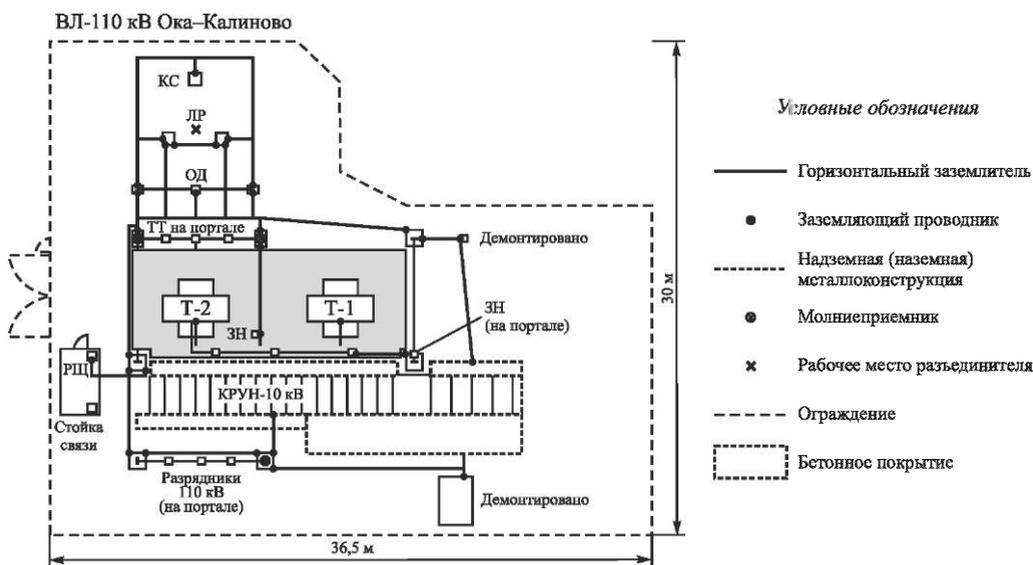


Рис. 9.75 План расположения оборудования и ЗУ на ПС

**Наведенные перенапряжения во вторичных цепях.** При ударе молнии в молниевотвод, установленный на портале ОРУ 500 кВ подстанции, из-за наведенных перенапряжений в сети постоянного тока возникли короткие замыкания, и произошло

отключение питания устройств релейной защиты. Неправильная работа устройств релейной защиты привела к полному отключению подстанции 500/220 кВ.

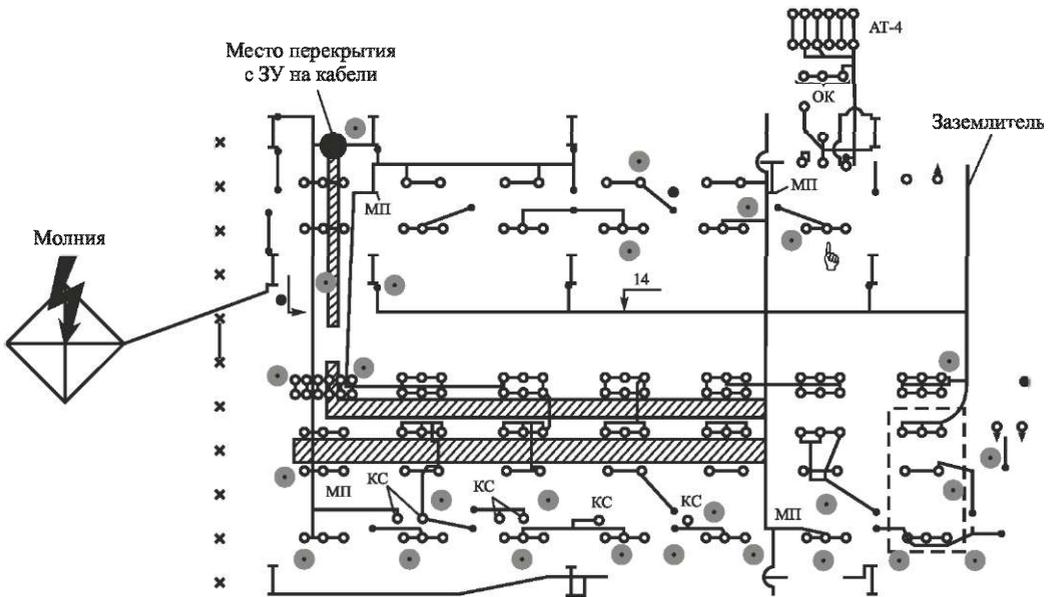


Рис. 9.76. Схема перекрытия ЗУ на кабели на ОРУ 110 кВ

На подстанции 110/220 кВ удар молнии в антенную мачту привел к перекрытию изоляции кабелей в кабельном канале с заземляющего устройства и возникновению пожара. Из-за термического повреждения кабелей (рис. 9.77) подстанция была полностью отключена.



Рис. 9.77. Перекрытие на кабель с заземляющего устройства молниеотвода

Из-за наведенных перенапряжений в кабелях сигнализации при ударе молнии в молниеотвод, установленный на портале ОРУ 220 кВ произошло отключение всей сигнализации, из-за неправильной работы устройств релейной защиты от импульсных помех отключились два выключателя 220 кВ.

### **9.9.3. Расчет вторичных воздействий молнии на энергообъектах**

Для определения вторичных воздействий молнии проводят расчеты с применением специальных компьютерных программ.

#### **9.9.3.1. Расчет распределения тока и напряжения по заземляющему устройству при ударе молнии в молниеотвод**

В качестве примера расчета распределения тока и напряжения по заземляющему устройству при ударе молнии в молниеотвод рассмотрим модель, реализованную в компьютерной программе ОРУ-М, разработанной по заданию РАО «ЕЭС» РФ и апробированной в электроэнергетике.

Из общих соображений в программе задача разделена на две существенно отличающихся по физическому содержанию задачи:

1. Расчет переходного процесса в разветвленной 3-мерной системе шин, расположенной в воздухе.
2. Расчет переходного процесса в 3-мерной системе шин и объемных тел, расположенной в проводящей среде (грунте).

Первая задача решается методами теории цепей со сосредоточенными параметрами, а вторая – методами теории поля.

#### **Этапы решения задачи**

1. Расчет  $m$  эквивалентных параметров шин (активного сопротивления и индуктивности).
2. Расчет методами теории поля сопротивлений растеканию всех объектов, находящихся в грунте.
3. Расчет методами теории поля емкостей относительно земли шин, находящихся в воздухе.
4. Расчет методами теории цепей переходных процессов в системе шин. Определение распределения токов и потенциалов в системе шин.
5. Расчет методами теории поля распределения максимальных потенциалов на поверхности земли и шаговых напряжений.

#### **Расчет сопротивлений растеканию и емкостей**

Приняты следующие допущения.

1. Диаметр шин много меньше их длины, а их индуктивность при расположении в земле такая же, как при расположении в воздухе.
2. Объемные тела являются эквипотенциальными поверхностями, а индуктивность у них отсутствует.
3. Магнитными полями, создаваемыми токами растекания в грунте, пренебрегаем.

При принятых допущениях для отыскания эквивалентных параметров элементов ЗУ достаточно вычислить их сопротивления токам растекания. Задача решается путем сведения к решению уравнения Лапласа и использованию аналогии между

электростатическим полем и полем растекания стационарных токов в однородной проводящей среде. Электростатическая задача решается относительно зарядов при заданных потенциалах. Для ее решения используется метод эквивалентных потенциалов.

Все токоведущие шины и объемные объекты автоматически разбиваются на расчетные элементы (шины на стержневые элементы, а объемные тела на квадратные или прямоугольные элементы поверхности). При расчете сопротивлений растеканию учитываются только объекты, находящиеся в грунте, но добавляются фиктивные объекты, расположенные зеркально симметрично относительно поверхности грунта. При расчете емкостей объектов относительно земли учитываются только шины, расположенные в воздухе. Всем элементам присваивается единичный потенциал  $V$ . Считается, что заряд равномерно распределен по поверхности  $S$  каждого элемента.

Составляется система линейных уравнений относительно неизвестных зарядов элементов  $Q_j$ :

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{S_i} \alpha_{i,j} = V_j, \quad (9.27)$$

где  $j = 1, n$  ( $n$  – число элементов).

Диагональные коэффициенты  $\alpha_{i,i}$  для элементов шин длиной  $l$  и радиусом сечения  $r$  вычисляются следующим образом:

$$\alpha_{i,i} = \frac{r}{2\varepsilon} \ln \frac{l/2 + \sqrt{r^2 + (l/2)^2}}{-l/2 + \sqrt{r^2 + (l/2)^2}}, \quad (9.28)$$

а для прямоугольных элементов поверхности

$$\alpha_{i,i} = \left( 0,2918 - 0,0113 \frac{b}{a} \right) \sqrt{S_i}, \quad (9.29)$$

где  $a, b$  – размеры элемента. Недиагональные элементы вычисляются путем численного интегрирования по общей формуле:

$$\alpha_{i,j} = \frac{r}{2\varepsilon} \ln \frac{l - X_s + \sqrt{Y_s^2 + (l - X_s)^2}}{-X_s + \sqrt{Y_s^2 + (l - X_s)^2}}, \quad (9.30)$$

здесь  $d_{i,j}$  – расстояние между геометрическими центрами элементарных площадок на  $i$ -м и  $j$ -м элементах. Для элементов шин производится однократное интегрирование по длине, а для элементов объемных тел – двукратное интегрирование по поверхности. Система уравнений (9.1) дважды (для расчета частичных емкостей и сопротивлений растеканию) решается методом Гаусса–Жордана. Сопротивления токам растекания и частичные емкости рассчитываются по формулам:

$$R_3 = \frac{\varepsilon V}{\sigma Q}; \quad C = \frac{Q}{V}, \quad (9.31)$$

где  $\varepsilon, \sigma$  – диэлектрическая проницаемость и электропроводность среды,  $Q, U$  – заряд и потенциал тела при  $\sigma = 0$ .

### Расчет переходного процесса

На основании введенной схемы ЗУ и решения полевой задачи составляется схема замещения. Пример схемы замещения ЗУ приведен на рис. 9.78.

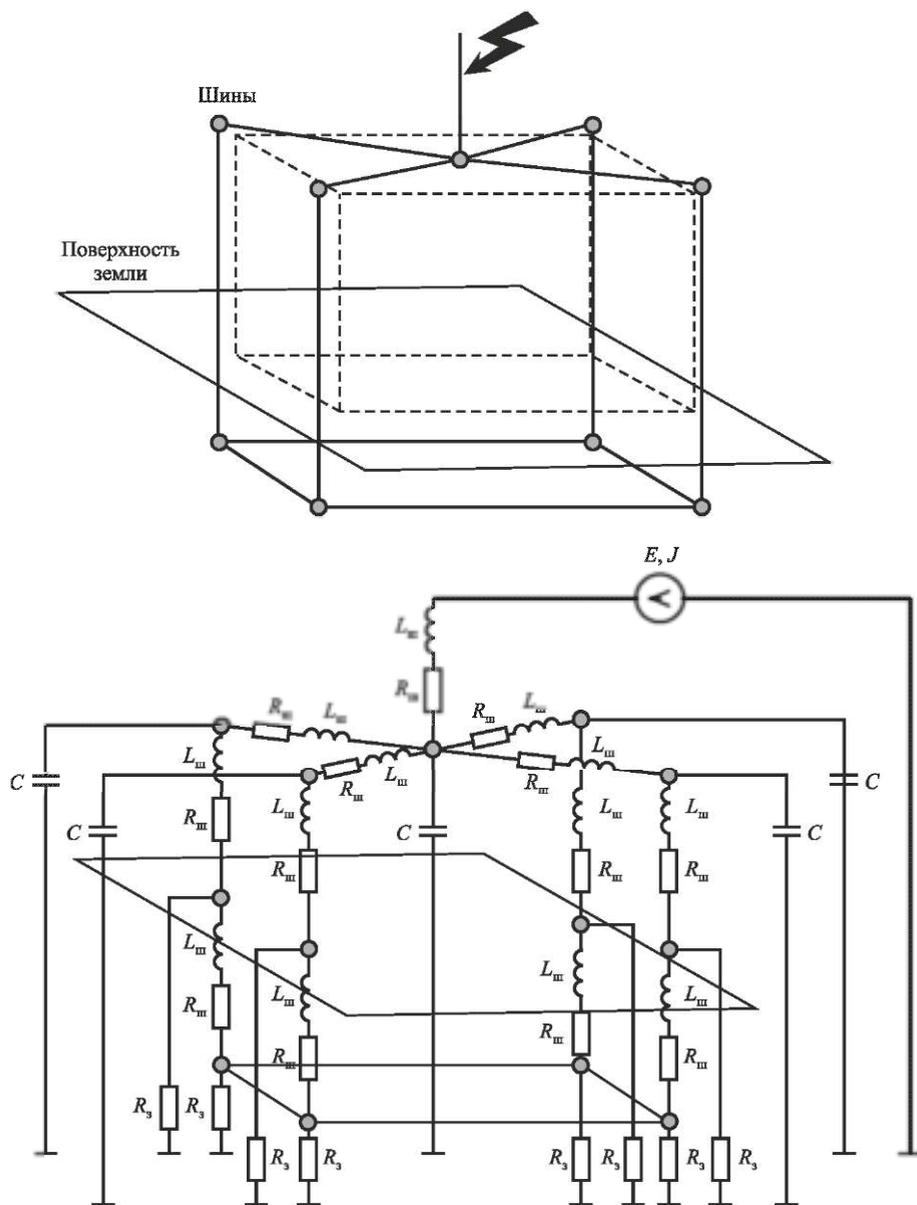


Рис. 9.78. Схема замещения заземляющего устройства

На рисунке обозначено:  $R_{ш}$ ,  $L_{ш}$  – активное сопротивление и индуктивность токоведущих шин;  $C$  – частичные емкости шин, расположенных в воздухе;  $R$  – сопротивления растеканию тока шин, или объемных тел, расположенных в грунте.

Расчет переходных процессов в схеме замещения проводится посредством версии метода узловых потенциалов, носящей название «синтетический метод».

### Расчет распределения потенциалов в грунте

В результате выполнения предыдущих этапов известны временные зависимости токов и потенциалов во всех компонентах ЗУ. Для расчета распределения максимальных потенциалов фиксируется момент времени, соответствующий максимальному усредненному значению потенциалов всех компонентов ЗУ, расположенных в грунте. Далее вновь решается система уравнений (9.27), но на этот раз потенциалы элементов  $V_i$  задаются исходя из результатов расчета переходного процесса. Найденное распределение зарядов расчетных элементов позволяет вычислить потенциал в любой точке грунта и его поверхности по формуле:

$$U_i = \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_{i,n}} \quad (9.32)$$

Если в грунте имеются компоненты, не имеющие гальванической связи с точкой подключения источника тока (напряжения), то их потенциалы вычисляются усреднением потенциала в объеме компонента. Затем система уравнений решается повторно.

#### 9.9.3.2. Расчет наведенных перенапряжений во вторичных цепях

Для расчета наведенных перенапряжений в кабельных линиях при ударах молнии в территорию энергообъекта применяют компьютерную программу «Interference», разработанную по заданию РАО «ЕЭС» РФ и апробированную в электроэнергетике.

При ударе молнии в землю у поверхности земли создается напряженность электрического поля, обусловленная двумя составляющими: электрической  $E_3 = -\text{grad } \phi$  и магнитной  $E_M = -\partial A / \partial t$ . Механизм возникновения электрической составляющей поясняет рис. 9.79.

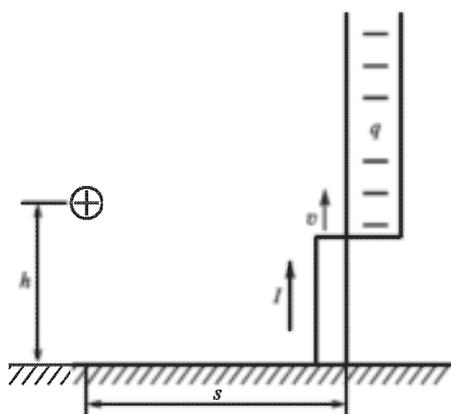


Рис. 9.79. Модель молнии

После того как начинается стадия главного разряда молнии, вверх по каналу предшествовавшего лидера движется волна ударного тока с фазовой скоростью  $v \approx 20000$  км/с. Вместе с волной тока расширяется область канала молнии, в которой заряды оказываются нейтрализованы. Соответственно, бывшие до этого связанными заряды в кабеле освобождаются, и потенциал кабеля относительно земли возрастает. Индуцируемую таким образом

вертикальную составляющую напряженности электрического поля вблизи земли можно записать в виде:

$$E_3 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 s} \quad (9.33)$$

где  $q$  – удельный (на единицу длины) заряд лидерного канала,  $s$  – расстояние от канала молнии. Учитывая, что ток молнии  $I$  может быть записан в виде  $I \approx qv$ , мы можем

найти величину э.д.с. индуцируемую между кабелем в данном его сечении и землей ( $c$  – скорость света):

$$e_s(t, s) \approx \frac{hI(t')}{2\pi\epsilon_0sv}, \quad (9.34)$$

$$t' = t - s/c.$$

Выражение для электрической составляющей ЭДС следующее:

$$e(t, s) = \frac{11I(t)h}{\beta s} \left[ 1 - \frac{1 - \beta^2}{\sqrt{\left(\frac{ct}{s}\right)^2 + 1 - \beta^2}} \right], \quad (9.35)$$

где  $\beta = v/c$ .

Горизонтальную составляющую электрического поля, обусловленную электрическим зарядом столба молнии, можно записать в виде:

$$E_h(t, s) = \frac{h(t')I(t')}{2\pi\epsilon_0vs\sqrt{h^2(t') + s^2}}. \quad (9.36)$$

Величина ЭДС, индуцируемая на отрезке кабеля длиной  $l$ , расположенном на расстоянии  $s$  от молнии, составит:

$$e_h(t, s) = \mathbf{E}_h(t, s)\mathbf{l}. \quad (9.37)$$

Магнитная составляющая электрического поля (вертикальная) возникает вследствие электромагнитного излучения импульсного тока молнии, и для любого сечения кабеля может быть вычислена по формуле:

$$E_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{v(t-s/c)} \frac{1}{s} \frac{dI(t')}{dt} da, \quad (9.38)$$

где  $da$  – элемент длины лидерного канала,  $s$  – расстояние этого элемента от данного сечения кабельной линии.

Магнитная составляющая, индуцируемой в данном сечении кабеля ЭДС, составит:

$$e_M(t, s) = \frac{\mu_0 h}{4\pi} \int_0^{v(t-s/c)} \frac{1}{s} \frac{dI(t')}{dt} da. \quad (9.39)$$

Для участков кабельной линии, находящихся под землей на глубине  $d \ll l$  ( $l$  – длина участка кабеля) может быть использован коэффициент ослабления электромагнитного поля.

Расчетная схема замещения кабельной линии представлена на рис. 9.80. Двухпроводная кабельная линия представлена как две связанных емкостной связью длинных *RIC*-линии, образованные проводниками и землей. В «проводники», моделирующие емкостную связь проводов с землей, включены источники изменяющихся во времени ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , генерируемых молнией (сумма ЭДС (1) и (3) в данном сечении кабеля).

ЭДС  $eh_1$  и  $eh_2$  моделируют воздействие на кабель горизонтальной составляющей электрического поля.

Сопротивления  $Z$  представляют собой активно-индуктивные сопротивления токоведущих участков в грунте. Переходные процессы при протекании импульсных токов в грунте в общем случае не могут быть описаны методами теории цепей. С другой

стороны, строгое решение задачи методами теории поля привело бы к неприемлемому увеличению времени счета. В настоящей модели были введены эквивалентные параметры участков грунта по аналогии с теорией индукционного нагрева металлов. Участок грунта без заземляющих устройств моделировался эквивалентными параметрами однородного проводящего полупространства с учетом скин-эффекта.

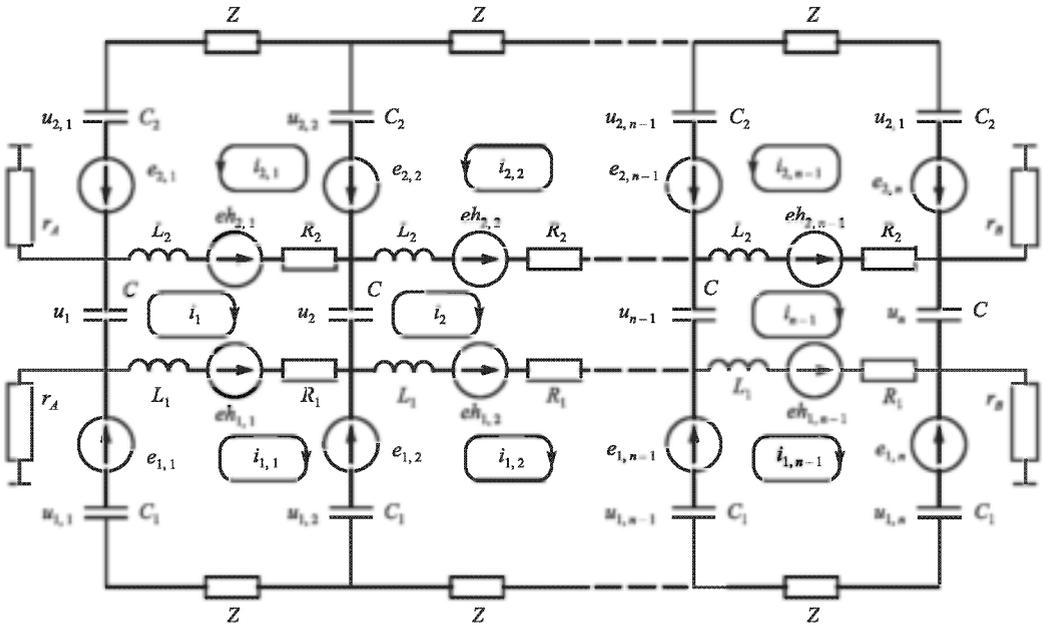


Рис. 9.80. Расчетная схема замещения кабельной линии

Погонная (на единицу длины) индуктивность линии с проводом рассчитывалась по формулам:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h + \Delta/2}{r}\right), \quad h \geq 0; \quad (9.40)$$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\Delta}{2r}\right), \quad h < 0,$$

где  $h$  – высота провода над землей;  $r$  – радиус провода;  $\Delta$  – толщина скин-слоя в грунте.

Вычисление активного сопротивления линии связано с определенными трудностями, поскольку распределение плотности тока в грунте имеет сложный характер. Прямой численный расчет распределения плотности тока в грунте привел бы к неприемлемому увеличению времени счета. В настоящей модели реальное распределение плотности тока в грунте заменяется полосой тока глубиной  $\Delta$  и некоторой шириной  $s$ . Погонное сопротивление линии:

$$R' = R'_{\text{пров}} + \frac{1}{s\Delta\sigma}$$

Здесь  $\sigma$  – удельная электропроводность грунта. Ширина токовой полосы  $s$  определялась из условия равенства индуктивности линии образованной проводом и проводящей плоскостью на расстоянии  $h + \Delta/2$  с одной стороны и линии образованной проводом и токовой

полосой шириной  $s$  на том же расстоянии. Выражение для индуктивности первой линии приведено выше. Индуктивность второй линии можно вычислить по формуле:

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{g_{AB}^2}{g_A g_B},$$

где  $g_A$  – среднее геометрическое расстояние (с.г.р.) провода от самого себя,  $g_B$  – с.г.р. полосы тока от самой себя,  $g_{AB}$  – с.г.р. провода от полосы тока.

$$\begin{aligned} g_A &= r, \\ g_B &= se^{-3/2}, \\ \ln g_{AB} &= \frac{1}{2} \ln [4(h + \Delta/2)^2 + s^2] - \ln(2) - 1 + \frac{2(h + \Delta/2)}{s} \arctan \frac{s}{2(h + \Delta/2)}. \end{aligned}$$

Расчетная зависимость ширины токовой полосы от величины  $h + \Delta/2$  приведена на рис. 9.81.

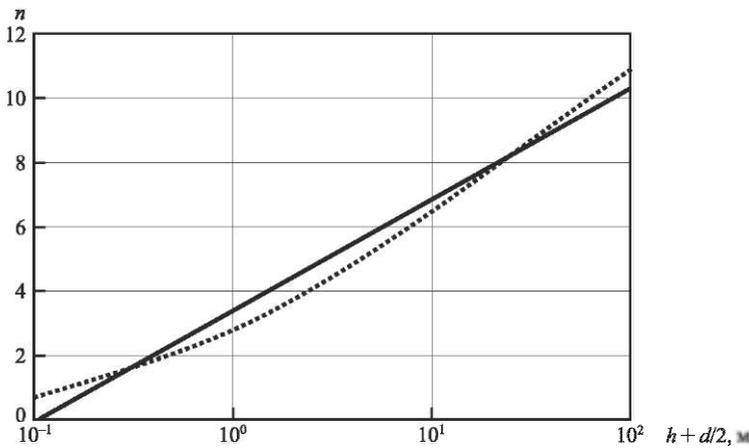


Рис. 9.81. Расчетная зависимость ширины токовой полосы

Эту зависимость можно аппроксимировать выражением:

$$s \approx 2,8 \log(h + \Delta/2) + 3,5.$$

Принималось, что на глубине  $\Delta$  и глубже потенциал равен нулю.

При наличии в грунте под участками линии заземляющей сетки расчет эквивалентных параметров проводился следующим образом. Часть тока равномерно распределена по толщине участка грунта над сеткой, а остальной ток протекает по сетке. Потенциал сетки принят нулевым, а под сеткой токи отсутствуют. Схема замещения участка линии единичной длины над заземляющей сеткой изображена на рис. 9.82. Здесь:

$$\begin{aligned} L'_{\text{гп}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h + d/2)}{r}, & R'_{\text{гп}} &= \frac{1}{khd\sigma}, & h > d; \\ L'_{\text{гп}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h + d/2)}{r}, & R'_{\text{гп}} &= \frac{1}{d^2\sigma}, & 0 < h < d; \\ L'_{\text{гп}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r}, & R'_{\text{гп}} &= \frac{1}{d^2\sigma}, & h < 0. \end{aligned} \quad (9.41)$$

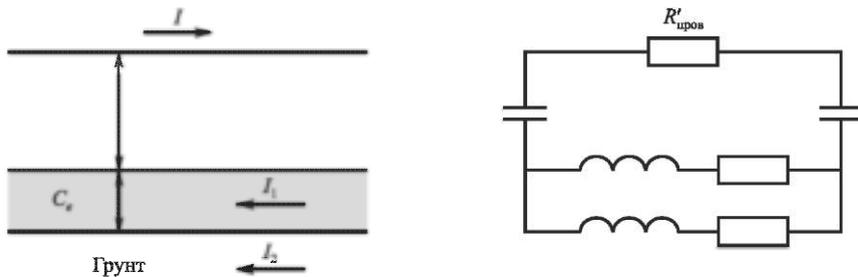


Рис. 9.82. Расчетная схема замещения участка единичной длины над заземляющей сеткой

Штрихом помечены погонные (относящиеся к единице длины) параметры. При расчете индуктивности  $L'_{сет}$  принималось, что линия состоит из прямого провода и нескольких обратных, расположенных параллельно прямому проводу на глубине залегания сетки. Расстояние  $b$  между обратными проводами приравнивалось к расстоянию между стержнями, составляющими сетку, а количество обратных проводов вычислялось как  $n = k(h + d)/b$ . В результате получаем линию с расщепленным обратным проводом, индуктивность которой вычисляется как:

$$L'_{сет} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{g_{AB}^2}{g_A g_B},$$

где  $g_A, g_B$  – с.г.р площадей поперечных сечений проводов от самих себя,  $g_{AB}$  – с.г.р этих площадей друг от друга. Расчет сопротивления  $R'_{сет}$  пояснений не требует.

Все расчетные элементы кабельных линий считаются индуктивно связанными. Взаимные индуктивности участков линий с учетом их расположения в пространстве вычисляются в соответствие с расчетной схемой на рис. 9.83.

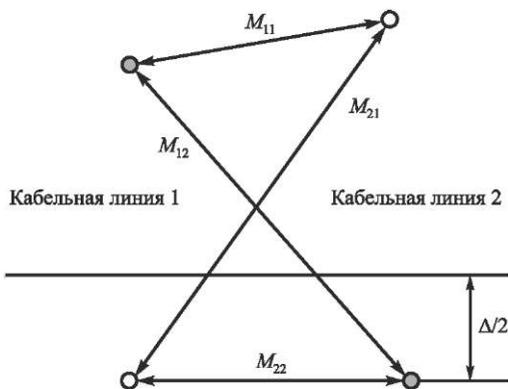


Рис. 9.83. Схема расчета взаимных индуктивностей

Суммарная взаимная индуктивность расчетных участков равна:

$$M = M_{11} + M_{22} - M_{12} - M_{21}.$$

Взаимные индуктивности вертикальных участков схемы замещения (см. рис. 9.83) не учитывались, поскольку токи смещения не создают магнитных полей. С учетом

нестационарного характера процесса результирующая ЭДС, наведенная в участке провода кабельной линии  $j$ , составит:

$$e_{mut,j}(t) = \sum_k M_{jk} \frac{di_k(t - v s_{jk})}{dt}, \quad (9.42)$$

где  $v, s_{jk}$  – скорость распространения электромагнитной волны и расстояние между расчетными участками. Далее решается система дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в схеме замещения.

### 9.9.3.3. Нормируемые параметры вторичных воздействий молнии

Параметры импульса тока молнии приведены в табл. 9.10 и 9.11, соответственно.

Для подстанций принимается уровень надежности защиты III–IV:

- максимальное значение тока первого импульса – 100 кА, длительность фронта – 10 мкс, длительность импульса – 350 мкс;
- максимальное значение тока второго импульса – 25 кА длительность фронта – 0,25 мкс, длительность импульса – 100 мкс.

Для зданий и сооружений реакторных и складов хранения радиоактивных материалов на атомных станциях принимается уровень надежности защиты I:

- максимальное значение тока первого импульса – 200 кА, длительность фронта – 10 мкс, длительность импульса – 350 мкс;
- максимальное значение тока второго импульса – 50 кА длительность фронта – 0,25 мкс, длительность импульса – 100 мкс.

Напряженность импульсных магнитных полей от тока молнии в соответствии с ГОСТ Р 50649–94 не должна превышать 300 А/м в местах размещения ТС. На рис. 9.84 приведена характерная зависимость изменения напряжённости магнитного поля во времени на расстоянии 10 м от места удара молнии. Коэффициенты экранирования зданий на эквивалентной частоте импульса молнии приведены в табл. 9.10. Дополнительный коэффициент экранирования может быть не менее 4, если ТС располагается в металлическом шкафу.

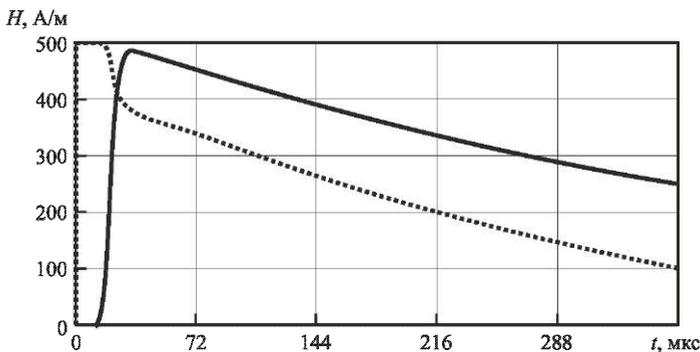


Рис. 9.84. Характерная зависимость изменения напряженности магнитного поля во времени

Перекрытие с ЗУ через грунт на контрольные кабели и перекрытие с поверхности земли на контрольные кабели может произойти, если расстояние до трассы прокладки кабелей меньше допустимого значения (рис. 9.85).

## Коэффициенты экранирования стен зданий

Вид здания	Кирпичное	С металлическим каркасом	Из сборного железобетона
Коэффициент экранирования на частоте 25 кГц	3	10	30

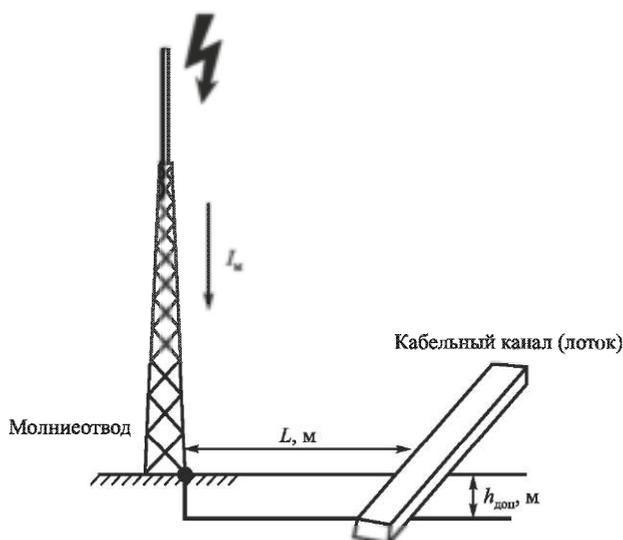


Рис. 9.85. Перекрытие с ЗУ на контрольные кабели

Импульсный потенциал ( $\phi$ ) на шине заземляющего устройства вблизи кабельного канала:

$$\phi = f(\rho)f(\mu)f(I_M)f(L)f(S),$$

где  $f(\rho)$  – зависимость от удельного сопротивления грунта;  $f(\mu)$  – зависимость от материала заземляющего устройства;  $f(I_M)$  – зависимость от характеристики тока молнии;  $f(L)$  – зависимость от геометрического расположения молниеприемника и кабельного канала (лотка);  $f(S)$  – зависимость от конфигурации заземляющего устройства.

$$h_{\text{доп}} = \phi/E,$$

где  $E$  – пробивная напряженность грунта (В/м).

Наибольшее напряжение на токоотводах и ЗУ молниеотводов не должно превышать значения напряжения электрического пробоя с токоотводов и ЗУ на кабели. Среднюю напряженность электрического пробоя в грунте принимают 300 кВ/м, а в воздухе – 500 кВ/м. Напряженность электрического пробоя по поверхности земли принимают 100 кВ/м.

Индуктированные импульсные перенапряжения во вторичных кабелях в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5–99 не должны превышать 4 кВ.

#### 9.9.4. Экспериментальные методы определения характеристик молниезащиты

Статистические данные свидетельствуют о том, что защита от прямых ударов молнии оборудования, зданий и сооружений может быть выполнена с высокой надежностью. Оценить надежность защиты от вторичных воздействий молнии расчетным путем можно только с большим приближением. Для определения надежности защиты от вторичных воздействий молнии применяются экспериментальные методы имитации ударов молнии в молниеотводы. В экспериментах используют сильноточные (до нескольких десятков килоампер) и слаботочные (десятки ампер) импульсные генераторы.

##### 9.9.4.1. Имитация молнии с помощью сильноточных импульсных генераторов

К преимуществам сильноточных генераторов относят воздействие током, близким к току молнии. Считается, что при таком воздействии воспроизводятся нелинейные эффекты, возникающие при больших токах.

Проводились экспериментальные исследования по имитации удара молнии в молниеотвод на подстанции с помощью генератора импульсных токов с емкостным накопителем энергии. В молниеотвод вводился ток амплитудой 30 кА с временем фронта 10 мкс, длительность полуволны 20 мкс. Регистрировались импульсные помехи в цепях устройств релейной защиты. При проведении экспериментов произошло повреждение устройства релейной защиты, и отключилась линия 110 кВ. Эти эксперименты показали, что применение сильноточных генераторов импульсных токов на действующих энергообъектах может привести к серьезным нарушениям в работе объекта.



Рис. 9.86. Эксперименты по имитации удара молнии в молниеотвод с помощью взрывомагнитного генератора

Аналогичные экспериментальные исследования проводились с помощью взрывомагнитного генератора с индуктивным накопителем энергии (рис. 9.86). Предварительно были проведены исследования с применением слаботочного генератора импульсных токов. По результатам этих исследований было установлено, что амплитуда импульсного тока не должна превышать 10 кА, чтобы не вызвать перекрытия изоляции контрольных кабелей с заземляющего устройства. Также была выбрана такая схема подключения генератора к молниезводу, чтобы снизить влияние разрядного контура на вторичные цепи до безопасного уровня.

Эксперименты показали, что применение сильноточных генераторов для имитации молнии на энергообъектах ограничено необходимостью создания низкоомного заземления второго вывода генератора, невозможностью исключить влияние контура генератора на вторичные цепи и недоступностью подключения генератора к большинству молниезводов на ОРУ.

#### ***9.9.4.2. Имитация молнии с помощью слаботочных импульсных генераторов***

Имитация удара молнии с помощью слаботочных (амплитудой не более 100 А) генераторов импульсных токов позволяет оценить воздействие молнии на вторичные цепи, не нарушая работы объекта. Экспериментальные исследования показали, что выходное напряжение генератора должно быть не менее 1,0 кВ, чтобы можно было успешно регистрировать импульсные помехи во вторичных цепях подстанции с ОРУ. Генератор последовательно подключается к каждому молниезводу, и проводятся измерения импульсных помех во вторичных цепях. Пересчет к реальным токам молнии для подстанций можно выполнять без учета или с учетом нелинейных эффектов, в зависимости от конкретного объекта.

Хорошие результаты получаются при оценке перенапряжений, воздействующих на вторичные цепи, для подстанций с закрытым распределительным устройством при правильном выборе схемы подключения генератора импульсных токов. Для зданий более 8 этажей выходное напряжение генератора должно быть выше 5 кВ.

На подстанциях с открытым распределительным устройством с помощью таких экспериментов можно получить достоверные результаты лишь по импульсным перенапряжениям, передающимся во вторичные цепи через заземляющее устройство.

#### ***9.9.4.3. Имитация молнии с помощью вертикально расположенного проводника***

Для оценки наведенных импульсных перенапряжений условия имитации молнии с помощью генераторов не адекватны реальным процессам. Очевидно, что поле, созданное током в замкнутом контуре сравнительно небольшого размера, может отличаться от поля тока, проходящего по каналу молнии. При определении наведенных импульсных перенапряжений в цепях вторичной коммутации необходимо применять метод имитации молнии с помощью вертикально расположенного проводника. Этот метод позволяет также определить реальные коэффициенты ослабления электромагнитного поля, которые используются при расчетах по методике, представленной в гл. 13.

Вклад в генерирование помехи от различных частей канала молнии зависит от расстояния от них до какой-то конкретной точки (или области) на территории подстанции. Импульсная помеха генерируется частями канала молнии, расположенными в непосредственной близости к поверхности земли.

Были проведены экспериментальные исследования, при которых регистрировались импульсные помехи в отрезках кабелей, созданные электромагнитными полями токов в вертикально расположенном проводнике (рис. 9.87) и в замкнутом контуре (рис. 9.87) и в замкнутом контуре.

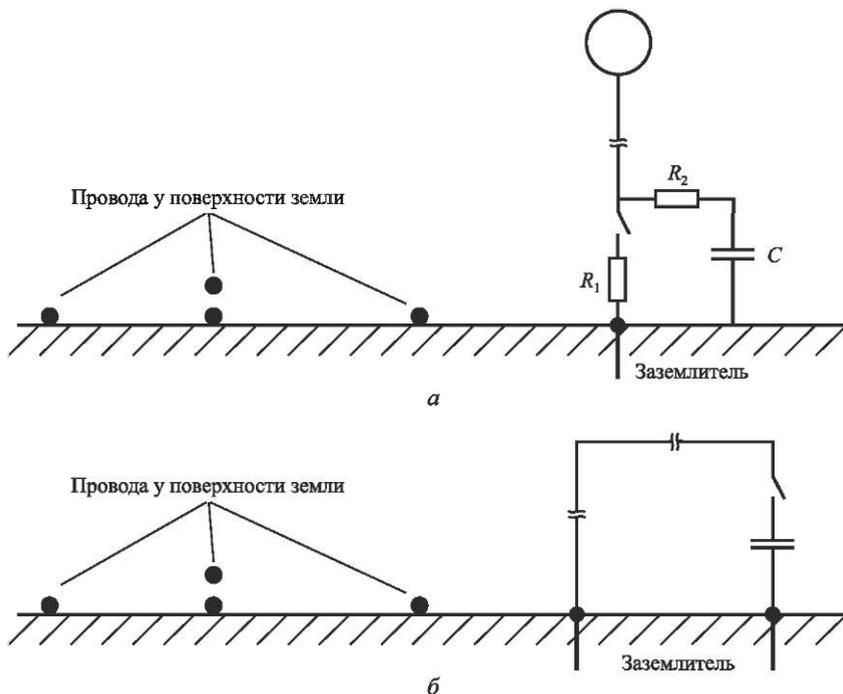


Рис. 9.87. Схема имитации молнии с помощью вертикально расположенного проводника

На поверхности земли на разных расстояниях от вертикального проводника были расположены провода в изоляции (один провод с экраном), в которых регистрировались импульсные помехи относительно земли (рис. 9.88).

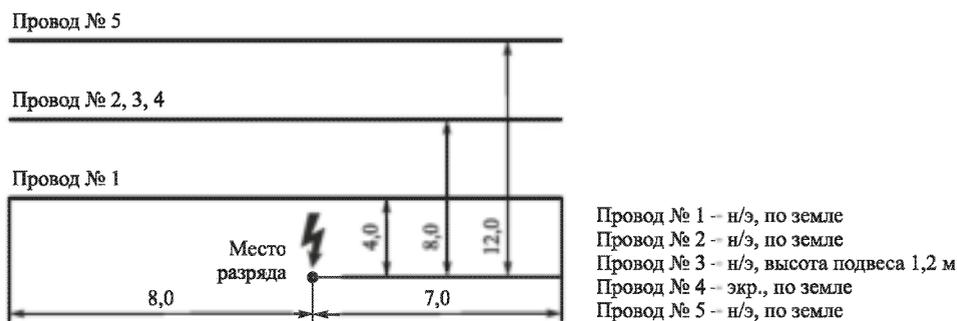
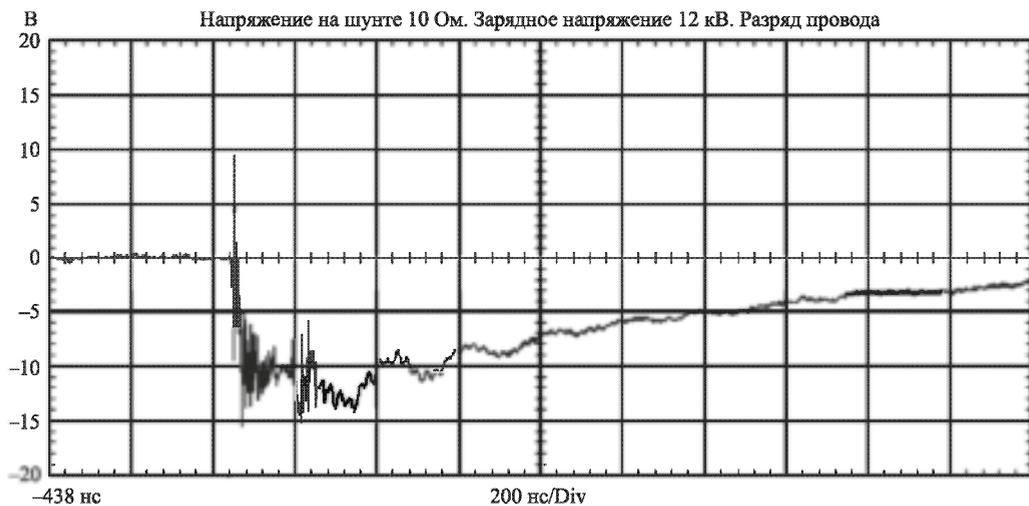


Рис. 9.88. Схема расположения проводников

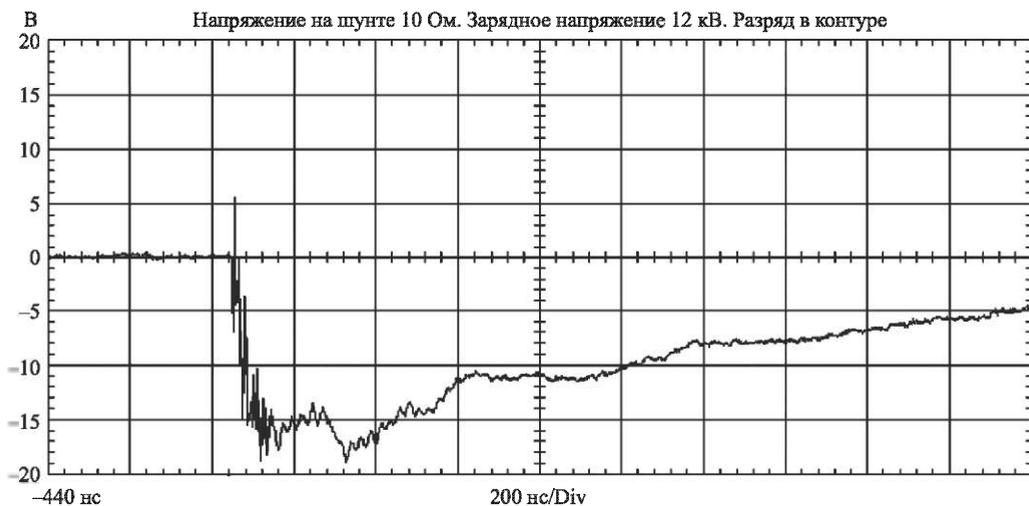
Измерения проводились с двумя источниками электромагнитного поля. Первым являлся вертикальный провод, поддерживаемый проводящей оболочкой. Провод заряжался до напряжения от 10 до 22 кВ, а затем через шаровой разрядник разряжался

на землю через сопротивление и вертикальный заземлитель. В процессе измерений изменялась длина провода от 10 до 25 м. Вторым источником электромагнитного поля был замкнутый контур с размером по вертикали 10 м и по горизонтали 15 м. Для создания тока в контуре использовался разряд предварительно заряженного конденсатора.

Характерные осциллограммы токов разряда вертикального провода (а) и конденсатора в замкнутом контуре (б) приведены на рис. 9.89. Для измерения тока в разрядную цепь включался коаксиальный токовый шунт сопротивлением 10 Ом. Зарядное напряжение в экспериментах изменялась от 11 кВ до 26 кВ. Амплитуда импульса изменялась путем изменения зарядного напряжения конденсатора С.



а



б

Рис. 9.89. Осциллограммы импульса тока

Из осциллограмм следует, что токи разряда на землю вертикального провода и контура имеют близкие по значениям амплитуды токов и длительности импульсов: длительность фронта тока около 0,2 мкс, длительность импульса (время полуспада) около

1 мкс. Импульс тока имеет аperiodический характер с наложенными высокочастотными колебаниями на фронте. Наличие высокочастотных быстро затухающих колебаний объясняется тем, что при разряде вертикального провода и конденсатора в контуре на большое сопротивление (6,7 кОм) можно рассматривать как включение короткой линии на несогласованную нагрузку.

Некоторые результаты измерений приведены в табл. 9.11.

Таблица 9.11

**Результаты измерений напряжений, наведенных на проводах, расположенных у земли**

Схема эксперимента	Импульс тока			$U_{зар},$ кВ	Наибольшее напряжение, наведенное на проводах относительно земли, В				
	$T_{ф},$ мкс	$T_{д},$ мкс	$I_{д},$ А		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Оболочка + провод длиной 25 м	0,2	1,7	3,2	26	30	14	52	1,8	
Оболочка + провод 10 м	0,2	1,12	1,3	11	17	12,6	52	2,4	9,2
Контур 10 · 15 · 10 м	0,2	2,0	1,6	12	29,2	6,7	34	2,2	7,2

Для того, чтобы определить влияние длины вертикального проводника на характеристики наведенных перенапряжений были проведены аналогичные эксперименты с моделированием молнии вертикальным проводником различной длины. Для тестирования компьютерной программы «Interference» было проведено сравнение результатов экспериментов с расчетами.

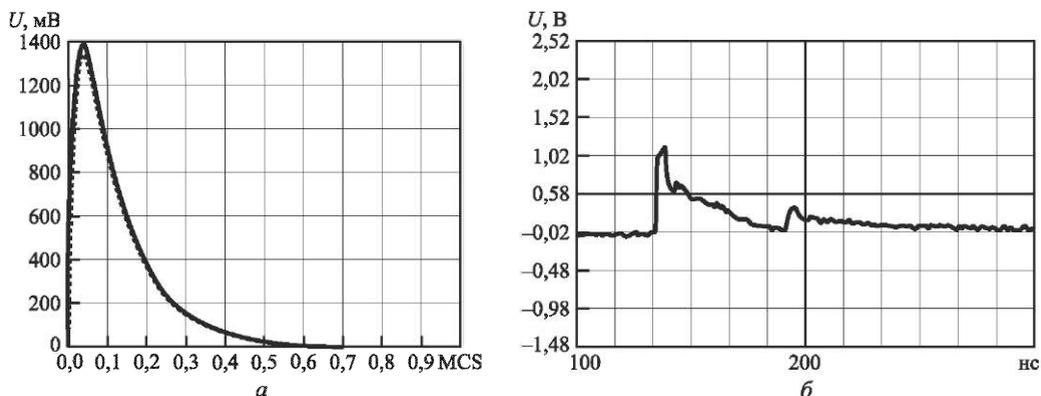
Провод длиной 8,5 м подвешивался вертикально через изолятор к потолку высоковольтного зала. От источника постоянного напряжения провод заряжался через сопротивление 100 МОм до 23 кВ и разряжался через шаровой разрядник на сопротивление 2 кОм, присоединенное к ЗУ. На расстоянии 4 м и 10 м непосредственно на полу прокладывался провод длиной 14 м. На конце провода с помощью осциллографа регистрировались осциллограммы на проводе относительно ЗУ. При определении характеристик импульса тока для снижения влияния помех на измерительные цепи использовался низковольтный источник напряжением 8 В. Коммутация осуществлялась механическим контактом заряженного проводника на токовый шунт 2 кОм. Осциллограмма импульса тока приведена на рис. 9.90а, б.

Типичная осциллограмма наведенных импульсных напряжений приведена на рис. 9.91.

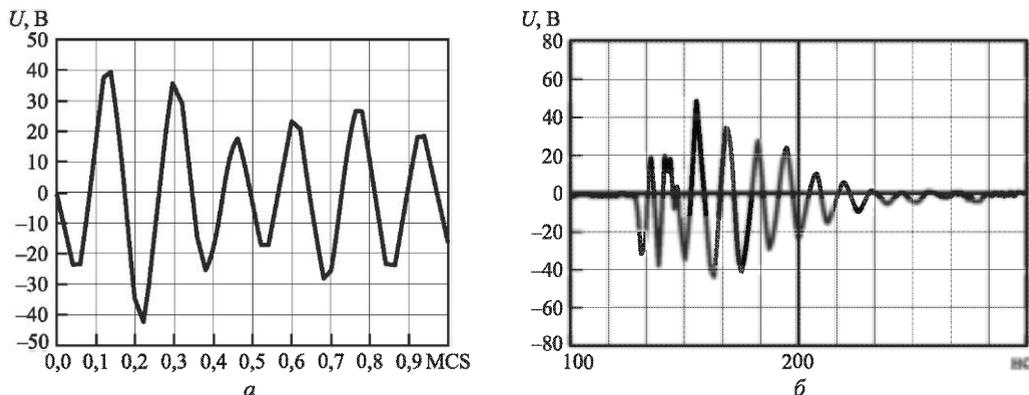
В результате проведенных экспериментов было получено, что расчетные значения тока и наведенных напряжений отличаются не более, чем на 15 %, что можно считать удовлетворительным.

Для того, чтобы найти минимальную длину вертикально подвешенного провода, при которой дальнейшее увеличение высоты не влияло бы на максимальные значения напряжения помех, длину провода уменьшали с 8,5 м до 3,7 м. При уменьшении длины вертикального проводника до 6,5 м максимальное значение наведенного напряжения не меняется, а при длине 4,7 м – изменяется на 15 %. При длине вертикального проводника 3,7 м максимальное значение наведенного напряжения уменьшается

примерно в 6 раз. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что при имитации молнии с помощью разряда вертикального проводника длина этого проводника должна быть не меньше расстояния до кабельной линии, в которой определяются наведенные перенапряжения.



**Рис. 9.90. Осциллограмма импульса тока:**  
*a* – расчет; *б* – эксперимент



**Рис. 9.91. Напряжение относительно заземляющего устройства  
 в проводнике длиной 14 м на расстоянии 4 м от вертикального проводника:**  
*a* – расчет; *б* – эксперимент

Для снижения наведенных перенапряжений рекомендуется увеличивать расстояние от молниеотводов до кабельных линий, применять экранирование кабелей, устанавливать устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

При увеличении расстояния от вертикального проводника с 4 м до 10 м максимальное значение наведенных перенапряжений уменьшается примерно в 4 раза, что соответствует расчетной модели. Измерения подтвердили, что экранирование кабелей приводит к уменьшению наведенных напряжений. К такому же результату приводит уменьшение их высоты над землей.

Низкоомная нагрузка снижает уровень наведенных перенапряжений на том конце проводника, где она установлена, но на другом конце перенапряжения не снижаются. В месте установки УЗИП уровень перенапряжений ограничивается, но эффективность

их действия снижается по мере удаления от места установки (ограничивается определенным расстоянием). Эксперименты показали, что при наведенных перенапряжениях в десятки киловольт в проводнике происходят многократные перекрытия изоляции по всей длине проводника (рис. 9.92).



**Рис. 9.92. Многократные перекрытия изоляции по всей длине проводника**

В результате проведенных экспериментов было получено, что расчетные значения токов и наведенных перенапряжений отличаются не более, чем на 15 %, что можно считать удовлетворительным.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в кабельных линиях для определения наведенных импульсных перенапряжений от молнии можно использовать разряд вертикального проводника.

Длина вертикального проводника должна быть не менее расстояния до кабельной линии. Зарядное напряжение проводника выбирается из условий проведения экспериментов и составляет более 10 кВ.

УЗИП имеют ограниченную зону действия и не устраняют пробой изоляции кабелей по длине линии.

### **9.9.5. Результаты обследования молниезащиты энергообъектов**

Проведенные исследования позволили разработать экспериментально-расчетный метод определения надежности молниезащиты энергообъектов с помощью слаботочных генераторов импульсных токов. Применение этого метода возможно на действующих энергообъектах.

При проведении обследования молниезащиты с помощью имитации молнии выполняются измерения на объекте:

- распределения напряжений по заземляющему устройству (вблизи прохождения кабельных трасс) с целью определения возможности перекрытия на кабели);
- измерение наведенных импульсных помех в кабеле, проложенном параллельно трассе вторичных кабелей;
- измерение наведенных импульсных помех во вторичных кабелях, шинах оперативного постоянного тока и собственных нужд, на входных клеммах устройств систем релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также других систем энергообъекта, с целью определения реальных коэффициентов ослабления электромагнитного поля и возможных уровней импульсных помех;
- пересчет к реальным токам молнии.

Предложенные имитационные методы (с применением слаботочных генераторов) были реализованы при обследовании молниезащиты более 300 подстанций и станций напряжением 35–750 кВ. При проведении обследования ставились задачи не только определения надежности молниезащиты, но и выявления существенных недостатков и разработки оптимальных решений по повышению надежности молниезащиты энергообъектов.

По результатам проведенных работ было установлено, что удары молнии примерно в 10 % молниеотводов приведут к нарушениям в работе энергообъекта даже при небольших токах 10–15 кА (рис. 9.93). На большинстве подстанций России вторичные кабели проложены в кабельных лотках на поверхности земли. При расположении молниеотводов на расстоянии менее 5 м (примерно 5 % молниеотводов) наведенные импульсные перенапряжения могут превышать допустимые значения практически при любых токах молнии.

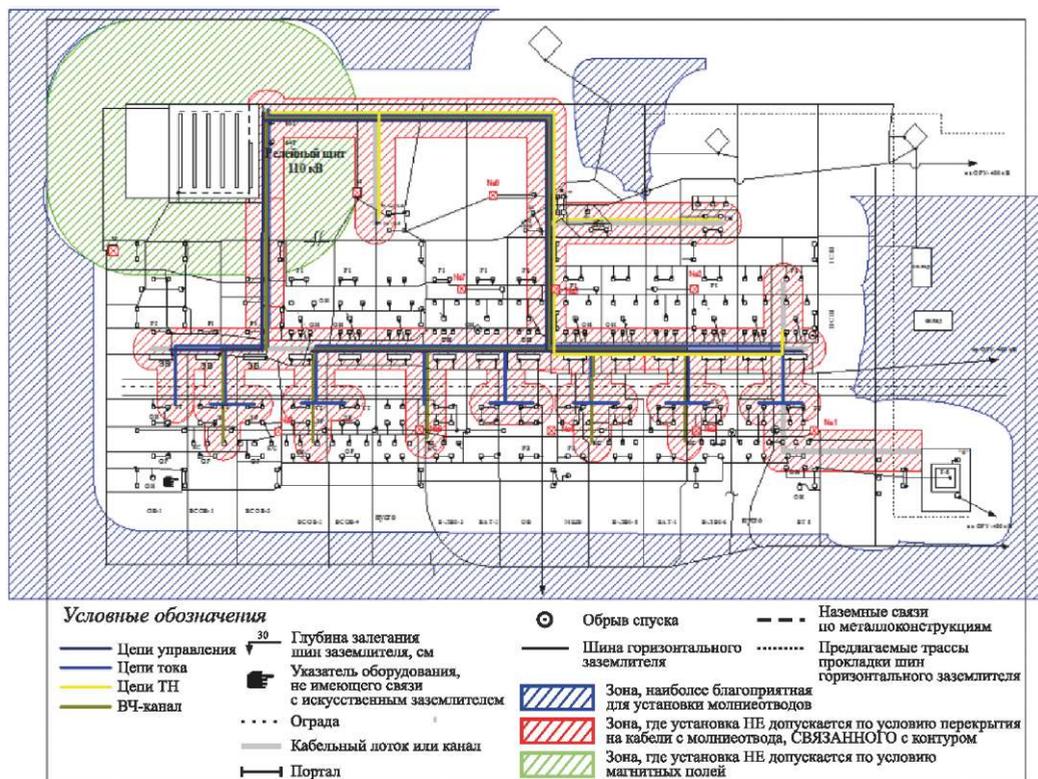


Рис. 9.93. Схема молниезащиты подстанции и зоны вторичных воздействий молнии

Следует заметить, что при расположении кабелей в кабельных каналах коэффициент экранирования составляет более 100. Коэффициент экранирования для типовых кабелей с экраном составил не более 10–20. В отдельных случаях молниеотводы присоединены заземляющими проводниками непосредственно к заземляющему устройству релейных щитов.

Для защиты от вторичных воздействий молнии применяют следующие мероприятия.

В тех случаях, когда для принятых проектных решений уровни импульсных магнитных полей превышают допустимые значения, изменяют место размещения молниеотводов (токоотводов) или выполняют дополнительное экранирование помещений.

Расстояния от молниеотводов до кабельных коммуникаций определяют из условия, что импульсные помехи при ударах молнии, наводимые во вторичных цепях, не будут превышать допустимые уровни.

Для снижения уровня импульсных помех применяют одно из следующих мероприятий:

- изменяют трассу прокладки вторичных кабелей или место размещения молниеотводов (токоотводов);
- принимают меры по увеличению коэффициента экранирования кабельной канализации (прокладка в кабельных каналах, металлических коробах или трубах, применяют кабели с более высоким коэффициентом экранирования).

В тех случаях, когда для принятых условий не выполняются требования по уровням импульсных помех или по условию обратного перекрытия с ЗУ на кабели, применяют одно из указанных ниже мероприятий:

- снижают импульсное сопротивление ЗУ молниеотвода, прокладывая дополнительно заземлители и заземляющие проводники;
- изменяют трассу прокладки вторичных кабелей;
- изменяют места размещения молниеотводов (токоотводов).

Для защиты от вторичных воздействий молнии при применении в качестве молниеприемника сетки на зданиях используют металлические конструкции зданий в качестве токоотводов, заземляющих проводников и заземлителей системы молниезащиты.

Для зданий с железобетонными конструкциями необходимо максимально использовать естественные элементы:

- в качестве молниезащитных заземлителей использовать железобетонные фундаменты зданий и внешние заземлители электросетевого объекта;
- в качестве токоотводов использовать стальные каркасы зданий (стальные колонны, фермы и балки);
- молниеприемную часть зданий выполнить из искусственных молниеприемников в виде «сетки» и (или) стержневых молниеприемников в соответствии с требованиями нормативных документов.

Гидроизоляцию фундамента здания выполняют битумными или битумно-латексными покрытиями. Применение полимерных покрытий при использовании фундамента здания в качестве молниезащитного заземлителя не допускается.

При наличии нескольких зданий, между которыми проложены вторичные кабели, необходимо прокладывать дополнительные заземлители (параллельные заземляющие проводники) для снижения разности потенциалов на ЗУ и токовой нагрузки на экраны кабелей.

Для кирпичных зданий выполняют искусственную систему уравнивания потенциалов. На всех этажах обеспечивают соединения металлических конструкций зданий с внутренней системой уравнивания потенциалов, а на отметке 0 м – соединения с внешним заземляющим устройством.

В местах установки антенн и другого оборудования на крыше здания предусматривают выводы для заземления оборудования. Все кабели, выходящие на крышу, прокладывают в стальных трубах.

Для защиты кабелей от вторичных проявлений тока молнии применяют экранированные кабели с заземлением экранов с двух сторон. Прокладку кабелей в пределах здания осуществляют в оцинкованных кабельных коробах, прокладку кабелей между зданиями рекомендуется осуществлять в подземных кабельных каналах или тоннелях.

При установке антенной мачты на электросетевом объекте должны быть выполнены мероприятия по защите от вторичных воздействий молнии системы связи и вторичного оборудования.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Что такое молния?
2. Какие механизмы накопления зарядов в грозовом облаке?
3. Какие особенности формирования отрицательной нисходящей молнии?
4. Каковы основные параметры главной стадии молнии?
5. От чего зависит грозовая активность на земном шаре?
6. Как происходит поражение наземных объектов молнией?
7. В чем заключаются вторичные воздействия молнии на объекты?
8. Изложите основные принципы защиты от прямых ударов молнии.
9. Как определяются защитные зоны стержневых молниеотводов?
10. Как определяются защитные зоны тросовых молниеотводов?
11. Какие отличия в определении защитных зон по рекомендациям Международной электротехнической комиссии и по отечественным нормативным документам?
12. Какие токи молнии нормированы?
13. При каких условиях наблюдается наибольшая крутизна тока молнии?
14. Изложите основные особенности определения поражаемости молнией воздушных линий электропередачи.
15. Поясните перспективы и принцип физического моделирования формирования молнии и поражения ею объектов с помощью искусственных грозовых ячеек.
16. Изложите основные рекомендации МЭК по молниезащите наземных зданий и сооружений.
17. Как выполняется молниезащита зданий с крышей из изоляционного материала?
18. Как соединяется молниеприемник с заземлителем?
19. Изложите особенности организации защиты электротехнического и другого промышленного оборудования от прямых ударов молнии.
20. Импульсные электромагнитные воздействия при ударах молнии.
21. Методы расчета электромагнитных воздействий молнии.
22. Методика экспериментального определения уровней электромагнитных воздействий от молнии
23. Нормируемые параметры электромагнитных воздействий от молнии.
24. Мероприятия по защите от вторичных воздействий молнии.

---

---

# ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОМЕХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ПОДСТАНЦИЯХ

---

---

### 10.1. Общие положения

**Виды компоновок.** Здесь будут рассмотрены наиболее общие возможные планы размещения оборудования и его взаимосвязь с источниками возмущений, а также отмечены факторы, способствующие снижению помех, например наличие сети заземления, экранирующих конструкций и т.п.

Будет показано, что уровень помех, воздействующий на устройство, зависит от месторасположения остального оборудования, с которым связано рассматриваемое устройство. Такой подход позволит ввести понятия различных классов электромагнитного окружения.

**Подстанции высокого напряжения.** На рис. 10.1 приведен план подстанции высокого напряжения. Объекты подстанции можно разделить на 3–4 основные категории: оборудование высокого напряжения, помещения релейных щитов, щиты управления и иногда комнаты связи, причем все объекты связаны между собой цепями вторичной коммутации.

В некоторых ситуациях релейные щиты могут отсутствовать. В этих случаях их функции выполняют щиты управления.

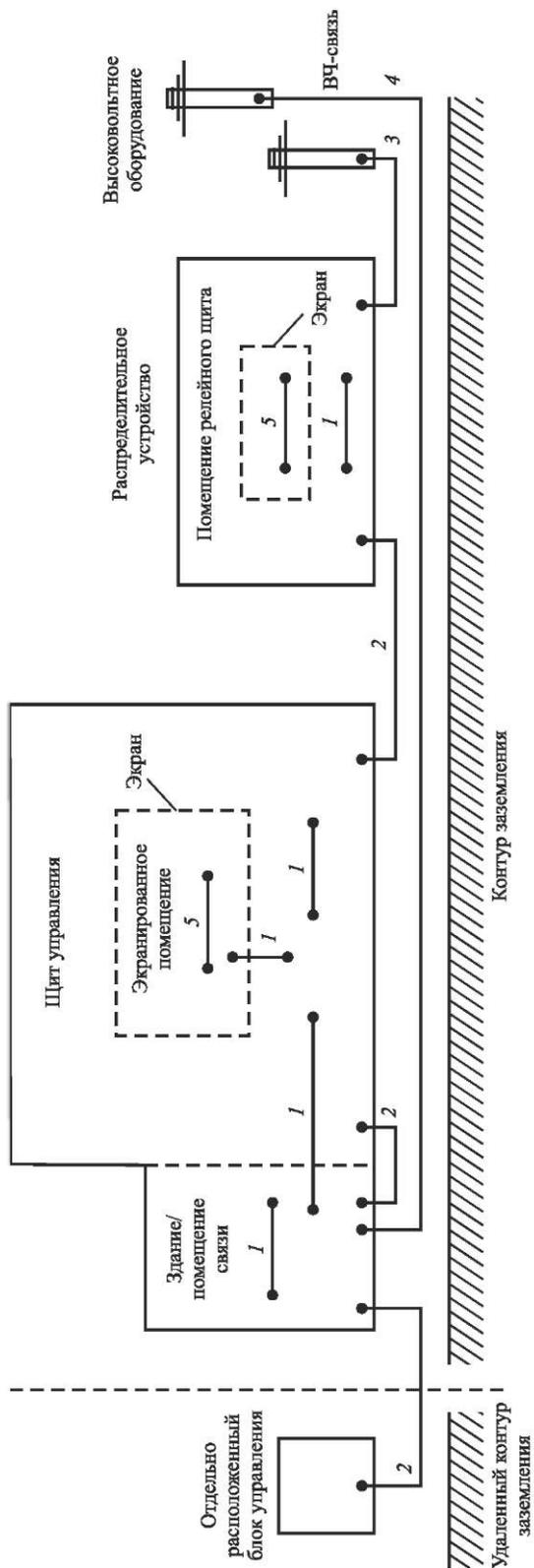
Комната связи также может быть либо входить в состав щита управления, либо располагаться отдельно.

Все описанные объекты в нормальных условиях присоединены к единой сети заземления или к нескольким взаимосвязанным сетям заземления (если уровни их потенциалов различны).

**Электростанции.** План расположения оборудования обычной электростанции приведен на рис. 10.2.

На электростанции, в зависимости от места расположения, можно выделить три вида объектов:

1. Основное здание, в котором располагаются помещения, предназначенные для:
  - силовых энергоблоков;
  - коммутационной аппаратуры;
  - выполнения функций управления;
  - компьютеров.



**Рис. 10.1. План типового высоковольтной подстанции и соответствующие виды ЭМ окружения:**

1 – кабели управления внутри помещений; 2 – кабели управления вне помещений; 3 – связи с оборудованием высокого напряжения, например с силовыми выключателями, измерительными трансформаторами и т.п.; 4 – связи коммутационные, например с устройствами передачи данных по ВЛ или удаленными оконечными устройствами; 5 – кабели связи, например внутри экранированных помещений (если таковые имеются)

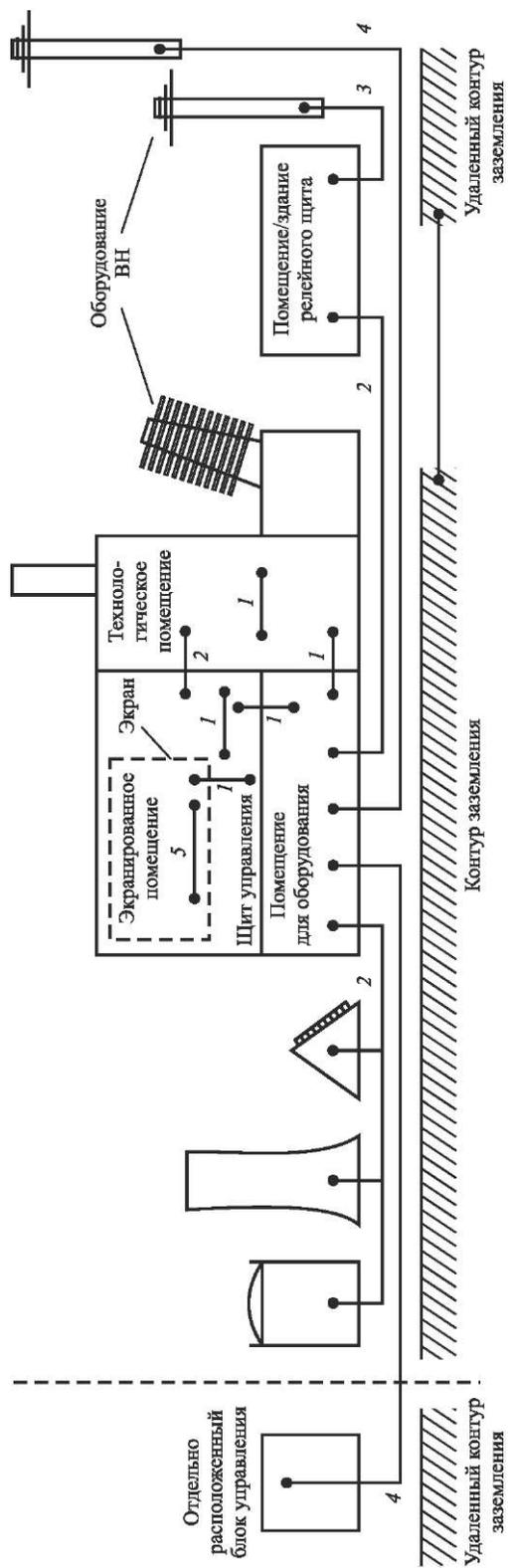


Рис. 10.2. План типовый электростанции и соответствующие типы ЭМ окружения (обозначения те же, что на рис. 10.1)

2. Распределительное устройство, которое само по себе может быть ПС высокого напряжения.
3. Вспомогательное оборудование:
  - емкости с топливом;
  - градирни;
  - оборудование для измерения параметров атмосферы;
  - дымовые трубы и т.д.

Обычно главное здание и распределительное устройство имеют общий заземлитель или два отдельных заземлителя, связанных между собой. Заземление вспомогательного оборудования может представлять собой либо простую защиту от ударов молнии, либо расширение основного заземлителя, либо вообще может отсутствовать.

В отношении плана расположения оборудования особенных различий между обычными и атомными электростанциями нет, за исключением большей сложности последних, повышенных требований к их безопасности и использования некоторых сигнальных цепей особо низкого уровня напряжений. Более того, в связи с расположением котлов в отдельном здании многие электрические и электронные сети на АЭС имеют большую длину.

**Радиостанции.** Радиостанции, обслуживающие объекты электроэнергетики, часто устанавливаются в пределах подстанций или электростанций. Такой способ установки имеет достоинство в виде наличия хорошей заземляющей сети, а радиостанция, с точки зрения ЭМС, может быть сравнена со зданием релейного щита, хотя и имеет большую вероятность поражения ударом молнии.

При установке вдали от ВВ подстанций радиостанции обычно располагаются на возвышенностях, при этом часто имеет место повышенное сопротивление грунта, изолированная (отдельная) заземляющая сеть среднего качества и все та же повышенная вероятность поражения прямым ударом молнии.

Для всех указанных случаев следует обращать особенное внимание на выполнение связей такого оборудования (электропитание, телекоммуникации) с внешними объектами.

**Щиты управления.** Подобно радиостанциям щиты управления не обязательно располагаются вблизи ВВ оборудования и, как следствие, не всегда обладают хорошим заземляющим устройством. В части молниезащиты это может быть недостатком, но при рассмотрении других источников возмущений может быть и достоинством (КЗ на высокой стороне, коммутации и т.д.).

Таким образом, существенные для каждого конкретного щита управления принципы его исполнения, с точки зрения ЭМС, зависят от его электрического окружения:

- при установке в пределах ПС, он может быть приравнен к зданию управления;
- если в состав входит антенна связи, он может быть частично приравнен к радиостанции;
- в случае установки щита в отдельном здании, расположенном в городе, никаких специальных мер в части ЭМС принимать не требуется.

**Типы сигналов и их уровни.** Помехи оказывают влияние на оборудование непосредственно или, что бывает чаще, через кабели.

В последнем случае уровень помех и порог невосприимчивости зависят, в основном, от двух факторов:

- типа кабеля и способа подключения;
- типа передаваемого сигнала.

Первый фактор характеризуется коэффициентом экранирования, определенным в гл. 8.

Второй фактор грубо может быть охарактеризован амплитудой (в вольтах или амперах) и шириной спектра или скоростью нарастания сигналов, и на первый взгляд, при рассмотрении вопросов ЭМС не очень существенно, какие сигналы рассматриваются – цифровые или аналоговые.

Кроме того, можно было бы также классифицировать сигналы в зависимости от вида оборудования, между которым передаются эти сигналы, или в соответствии с типом ЭМО, в которой находится оборудование.

Хотя между тремя упомянутыми видами классификации (по типу сигналов, оборудования, окружения) существует некоторая взаимосвязь, здесь будет приведена классификация с учетом следующих обстоятельств:

- другие виды классификаций имеют слишком много исключений, например, широкополосные сигналы низкого уровня, проходящие в пространстве со сложной ЭМО и наоборот;
- типы сигналов обладают большей изменяемостью, чем их окружение.

Классификация сигналов по четырем классам, расположенных в порядке убывания чувствительности оборудования к ЭМ-возмущениям приведена в табл. 7.6.

Следует отметить, что хотя в данной классификации цифровые и аналоговые сигналы отнесены к одному типу (различаясь индексами а и б соответственно), подобное объединение имеет некоторые ограничения вследствие того, что цифровые и аналоговые системы на практике ведут себя совершенно по-разному.

## **10.2. Основные концепции выполнения заземления и прокладки кабелей**

### **10.2.1. Правила выполнения заземления и прокладки кабелей**

Во всех последующих разделах, посвященных выполнению заземления и прокладки кабелей, будут использоваться основные принципы, изложенные в гл. 2, 4, 7. По этой причине приведем основные положения:

- цепи заземления должны иметь, по возможности, больше взаимных связей. За исключением некоторых ситуаций следует без колебаний увеличивать число связей оборудования с заземляющим устройством, а не увеличивать их сечение;
- следует уменьшать площадь петли электрических (и электронных) цепей. По возможности для цепей, присоединенных к одному оборудованию, следует использовать один путь прокладки кабелей. Всегда в качестве прямого и обратных проводов следует использовать жилы одного и того же кабеля. Следует избегать соединения более чем одной точки сигнальной цепи с землей (за исключением некоторых ВЧ связей коаксиальными кабелями или в случае небольших цепей, построенных на качественно выполненной эквипотенциальной плоскости нулевого потенциала);
- следует располагать все части (заземленных) сигнальных цепей по возможности ближе к заземляющим проводникам с целью улучшения коэффициента ослабления и уменьшения передаточных сопротивлений;

- не следует располагать в непосредственной близости цепи (заземления или сигнальные цепи), по которым передаются (или могут передаваться) токи или напряжения, сильно различающиеся по амплитуде.

Некоторые изложенные требования, могут иногда оказаться противоречащими друг другу, особенно когда речь идет о сети заземления, по которой возможно протекание больших токов, например, токов молнии.

С одной стороны, электрические цепи должны располагаться на определенном расстоянии от подобных заземляющих проводников. С другой стороны, кабели следует располагать максимально близко к заземляющим проводникам.

Причиной обоих этих требований является общий принцип уменьшения общего для двух цепей магнитного потока (рис. 10.3).

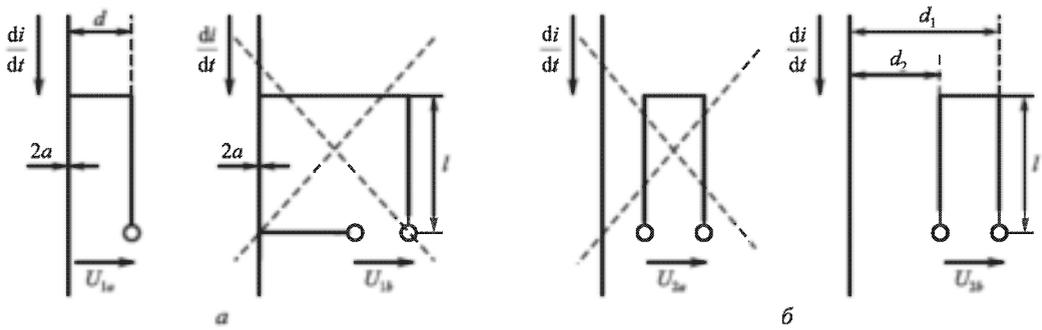


Рис. 10.3. Индуктивная связь между заземленным проводником, по которому протекает большой ток  $i$ , и чувствительной цепью  $l$ ,  $d$  или  $l$ ,  $d_1 - d_2$ :

$$a - U_1 = \frac{di}{dt} \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{d}{a}; \quad б - U_2 = \frac{di}{dt} \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{d_1}{d_2}$$

Противоречивыми также являются требования располагать сигнальные цепи по возможности ближе к заземленным проводникам и требование удалять сигнальные цепи от цепей, по которым передаются или могут передаваться токи или напряжения большой амплитуды (уменьшение связи через общее сопротивление).

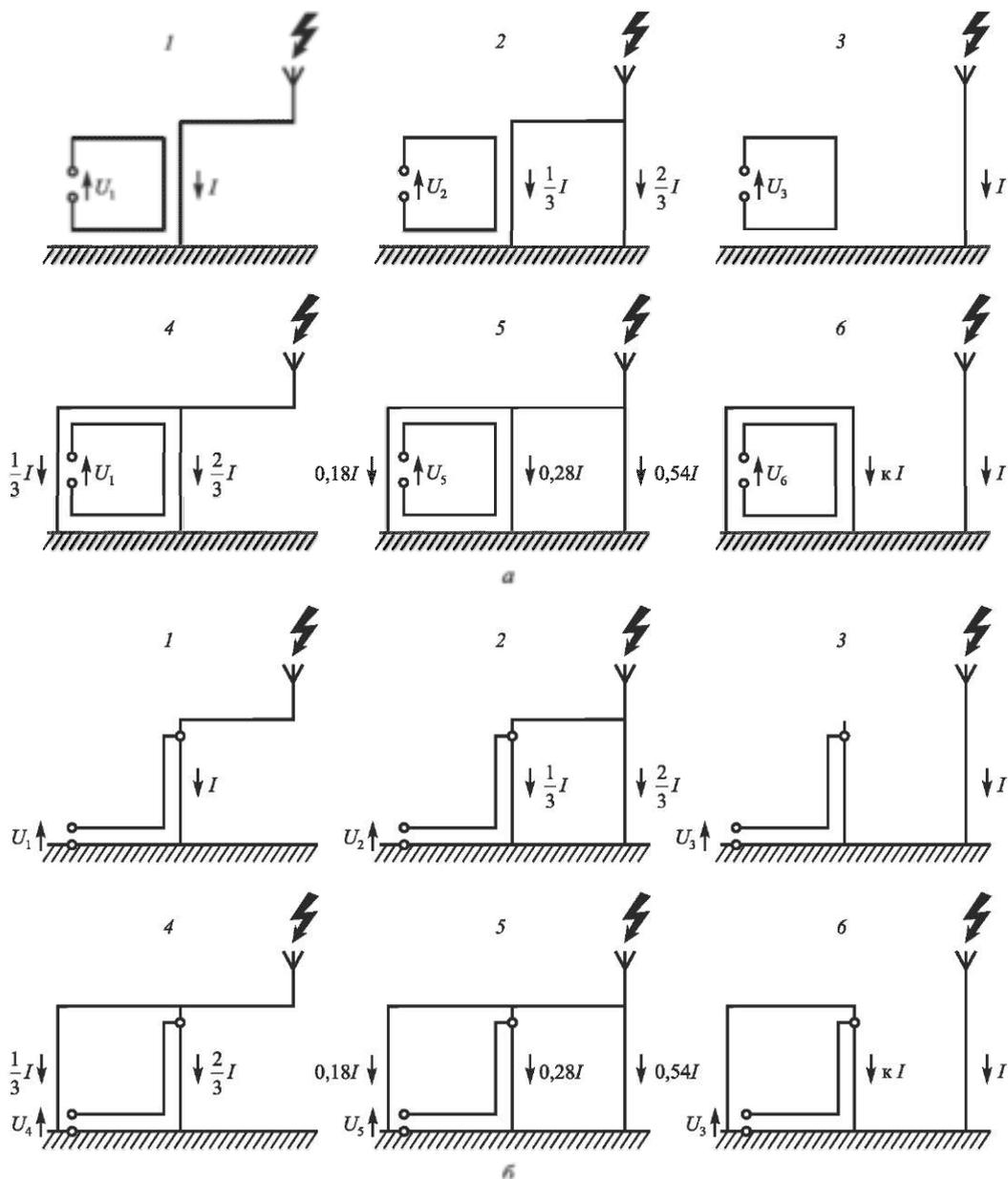
Компромисс между требованиями может быть достигнут посредством прокладки множества заземляющих проводников с целью уменьшения тока, протекающего по каждому отдельному проводнику, и обеспечения пути с низким сопротивлением для протекания наибольших токов.

На рис. 10.4 данные основные правила проиллюстрированы более подробно; на них приведены схемы для сравнения шести различных способов связи проводника тока молнии (например, приемное устройство антенны), идущего к заземляющему устройству электрической цепи.

На рис. 10.4а цепь представляет собой вертикальную квадратную петлю, имеющую относительно большую площадь:

- случай 1 – часть петли располагается вблизи заземляющего проводника;
- случай 2 – 2/3 тока молнии отводится непосредственно в землю;
- случай 3 – ток помехи  $i$  протекает на расстоянии от сигнальной цепи.

При сравнении этих трех случаев видно, что уровень помех в системе, изображенной на рис. 10.4а, (1) наибольший, а на рис. 10.4а, (3) – наименьший.



**Рис. 10.4. Индуктивная связь между устройством молниезащиты:**

*а* – замкнутой цепи;

*б* – заземленной цепи через общее сопротивление с устройством молниезащиты

Однако при прокладке всей цепи вблизи заземленных проводников становится более очевидной выгода этого.

На рис. 10.4*а*, (4) протекающий в заземляющее устройство цепи ток молнии не создает никаких помех в петле.

Причиной этого является то, что ток, разделенный на две части, может создавать в квадратной (или любой прямоугольной) петле магнитные потоки одинаковой амплитуды, но разного направления.

На этом рисунке условно показано, что ток, протекающий по правой стороне заземленной цепи в два раза больше тока на левой стороне, а длина его пути в полтора раза меньше. Следует отметить, что в данной, а также в большинстве других практических ситуаций, ток делится на части, обратно пропорциональные длинам соответствующих проводников (при этом делается допущение о приблизительно одинаковом поперечном сечении проводников). При неравенстве токов, а также вследствие наличия на рис. 10.4а, (4) горизонтального участка *a* компенсации магнитного потока будет неполной, и в петле будет индуцироваться напряжение  $U_4$ .

Схемы рис. 10.4а, (5) и 10.4а, (6) менее предпочтительны для данной конкретной конфигурации, так как часть тока, попадающего непосредственно в заземлитель, образует петлю, магнитный поток которой не может быть скомпенсирован.

Очевидно, что показанные на рис. 10.4а расположения цепей нечасто встречаются в действительности.

Наиболее общая ситуация расположения приведена на рис. 10.4б, где показано синфазное напряжение, появляющееся на одном конце цепи при заземлении ее другого конца.

Здесь важная часть цепи была намеренно установлена в непосредственном контакте с вертикальным заземляющим проводником, по которому может протекать весь или часть тока молнии.

В действительности на большинстве приведенных на данном рисунке схем приемная цепь имеет общее сопротивление с проводником для тока молнии, и, следовательно, располагается очень близко к нему. Однако наведенные напряжения могут быть близкими по величине к напряжениям, показанным на рис. 10.4а.

Примеры осциллограмм токов и напряжений в схемах, показанных на рис. 10.4а и 10.4б приведены на рис. 10.5.

Из приведенного материала можно сделать следующий вывод. Если существует возможность избежать протекания больших токов в проводниках системы заземления, то ей следует воспользоваться. Иногда это невозможно, например, при ударе молнии в антенну. В этих случаях приемлемым решением является создание для тока наилучшего (обладающего наименьшим сопротивлением) пути в землю.

С учетом этого всегда применяется принцип прокладки чувствительных цепей вблизи заземленных элементов. Если существуют сомнения по поводу отсутствия сильных токов в заземленных элементах, рекомендуется прокладка цепей в индивидуальных экранах или трубах.

## 10.2.2. Применение параллельных заземленных проводников

Большое значение имеет величина передаточного сопротивления между электрической цепью и заземленным проводником, включенным параллельно ей специально для снижения уровня помех.

Действие такого проводника направлено на снижение уровня наведенного на кабель синфазного напряжения. Это снижение определяется передаточным сопротивлением  $Z_i$  проводника по отношению к кабелю. Высокочастотная составляющая сопротивления сильно зависит от формы проводника, а не от площади поперечного сечения или свойств материала. На обоих концах проводник следует подсоединять к тем заземленным элементам корпусов оборудования, которые имеют похожее передаточное сопротивление (примерно одинаковую с проводником форму).

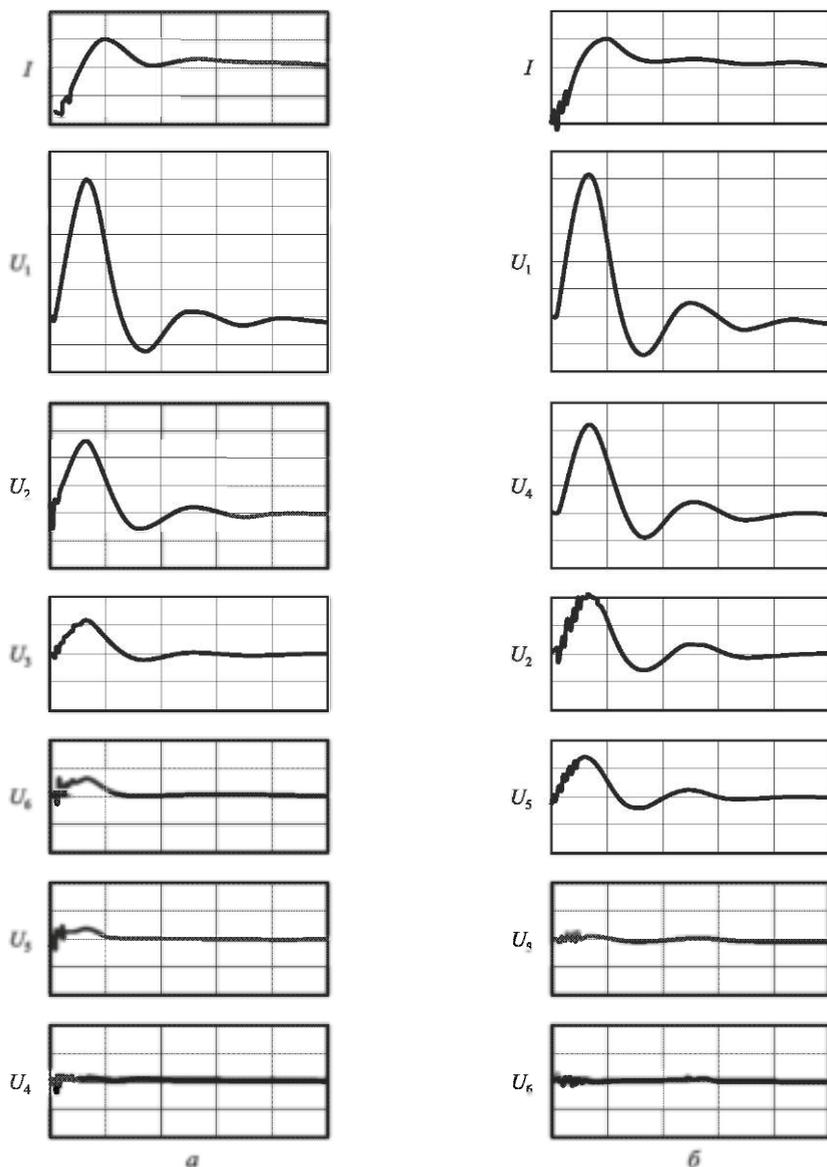


Рис. 10.5. Осциллограммы токов и напряжений в цепях, изображенных на рис. 10.4

Типовые формы параллельных заземленных проводников, обозначенных кружком с точкой, и соответствующие погонные взаимные индуктивности приведены на рис. 10.6.

Пример применения металлических труб в качестве параллельных заземленных проводников приведен на рис. 10.7. Такие решения могут быть реализованы на таких объектах энергетики, состояние заземляющего устройства которых вызывают сомнения.

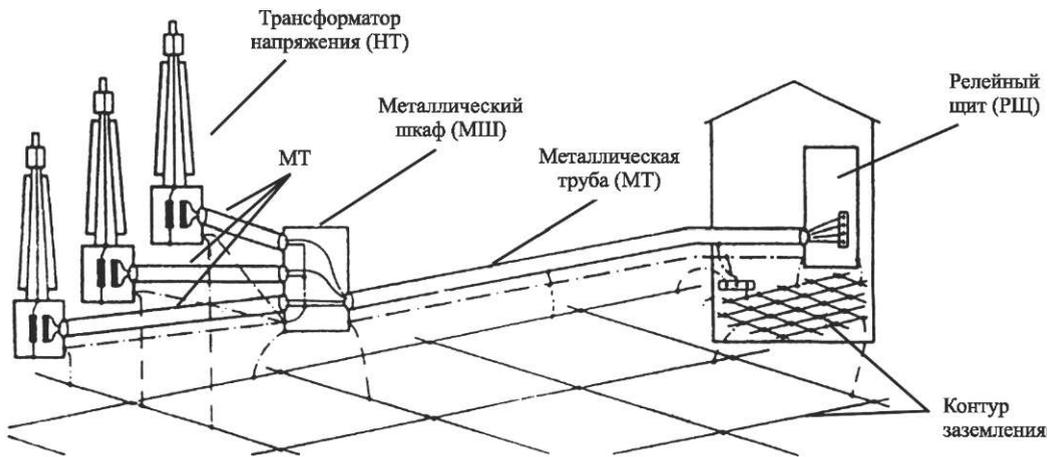
Действительный коэффициент эффективности экранирования, достигаемый за счет прокладки проводников вблизи экранированного кабеля, зависит от относительного распределения токов помехи в обеих цепях. Для простого заземленного

проводника это распределение практически обратно пропорционально сопротивлениям обеих цепей. Это означает, что для эффективного действия эквивалентное поперечное сечение проводника всегда должно быть больше общего сечения экранов всех кабелей. При другой форме проводника явление поверхностного эффекта вызовет протекание большей части тока высокой частоты по проводнику, а не по экрану защищаемого кабеля.



**Рис. 10.6. Различные виды расположения параллельного заземляющего провода 1 и основного заземляющего провода 2 в порядке увеличения эффективности действия:**

*а* – рядом с проводом защитного заземления; *б* – многожильный заземленный проводник, проложенный в траншее или рядом с экраном другой цепи; *в* – в кабельном лотке; *г* – в металлической трубе



**Рис. 10.7. Применение металлических труб в качестве параллельных заземленных проводников**

По этой же причине лучше использовать большое число относительно тонких проводников вместо одного с эквивалентной площадью поперечного сечения.

Также очень важно отметить, что когда заземляющий проводник оборудования (или экран кабеля) не располагается вблизи параллельного защитного проводника, токи помехи разделятся между этим проводником и другими заземляющими проводниками в соответствии с их индуктивностями. Отсюда следует, что соответствующие им поперечные сечения играют второстепенную роль, по крайней мере, на высоких частотах.

Другой важной особенностью параллельных заземляющих проводников является способность выполнять роль внешнего экрана триаксиального кабеля, внутренний экран, которого в силу различных причин не может быть заземлен с обеих сторон.

## 10.3. Рекомендации по выполнению заземлений на ПС высокого напряжения

### 10.3.1. Порядок выполнения заземления

Термин сеть заземления будем употреблять для описания всех взаимосвязанных проводников, предназначенных для создания эквипотенциальной сети, а термин заземление или контур заземления применительно ко всем проводникам, находящихся в земле.

Будем употреблять выражение заземлить для указания связи с сетью заземления (или с заземляющим контуром).

**Заземляющее устройство.** Заземляющее устройство предназначено для достижения следующих целей:

- создания небольшого сопротивления растекания;
- ограничения величины шагового напряжения и напряжения прикосновения;
- снижения синфазных ВЧ и НЧ помех;
- способности выдерживать протекание больших токов КЗ.

Для достижения этих целей контур заземления должен быть многократно замкнутым и выполняться на всей территории ПС, включающей в себя оборудование высокого напряжения и все ее строения.

Сопротивление растекания многократно замкнутой сети с периметром  $p$ , проложенной в грунте удельным сопротивлением  $\rho$ , может быть оценено по выражению  $R = 2\rho/p$ .

Глубинные заземлители (вертикальные и наклонные прутья, трубы) могут способствовать снижению сопротивления заземления небольших ПС или если сопротивление земли с увеличением глубины снижается. Однако они редко используются в целях снижения ЭМ помех.

Заземлитель по возможности должен быть заглублен, по крайней мере, на 50 см и ниже глубины промерзания грунта. Поперечное сечение проводников определяется максимальным допустимым падением напряжения при протекании токов КЗ. Обычно допускаются падения напряжения в диапазоне 1–3 В/м. По причинам механической прочности сечение проводника не может быть меньше 25 мм<sup>2</sup> для многожильных медных проводников и 90 мм<sup>2</sup> для защищенной от коррозии стали. На практике обычно используются медные прутья сечением 150 мм<sup>2</sup>.

Снижение наведенных напряжений требует создания контура с площадью ячейки сетки не более 250 м<sup>2</sup> при нормальном сопротивлении грунта ( $\rho < 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) и менее 150 м<sup>2</sup> при сопротивлении грунта, превышающем 1000 Ом · м.

Для снижения волнового сопротивления плотность сетки заземлителя должна быть повышена (например, до 5 × 5 м) вблизи оборудования высокого напряжения, особенно около силовых трансформаторов, емкостных трансформаторов напряжения, молниеотводов, опор линий электропередачи и других заземленных опорных конструкций, трансформаторов связи для систем передачи данных по ЛЭП.

**Заземление оборудования высокого напряжения.** Оборудование высокого напряжения должно быть установлено вблизи узла сетки заземления и связано с ней, по крайней мере, двумя, а лучше четырьмя проводниками, при этом их сечение определяется токами частотой 50 (60) Гц.

Металлическое основание оборудования высокого напряжения, ячейки управления, реле, небольшие здания и т.д. должны являться составной частью заземления.

Все заземляющие проводники должны иметь возможно меньшую длину.

При заземлении предпочтение следует отдавать соединению при помощи нескольких проводников, отделенных друг от друга на 10 см и более. В частности, силовые трансформаторы следует соединять с различными узлами сетки заземления при помощи нескольких проводников.

Следует избегать последовательного соединения заземляющих проводников различного оборудования.

Заземляющий проводник сечением не менее 50 мм<sup>2</sup> следует прокладывать в каждом кабельном канале или траншее и присоединять к заземляющему устройству на обоих концах, а если есть возможность, то и в нескольких других точках.

Все проводники заземления должны соединяться в местах пересечения.

**Связи между контурами подстанций.** Если две или более подстанций располагаются вблизи друг друга (например, понижающая подстанция, подстанции с РУ различного напряжения) и если между ними производится обмен измерительными сигналами, сигналами управления или связи, то их заземляющие устройства должны быть связаны, по крайней мере, двумя проводниками, сечение которых определяется максимальным ожидаемым током частотой 50 (60) Гц между заземляющими устройствами подстанций.

Расстояние между этими проводниками должно быть как можно большим. Кабельные каналы и траншеи следует прокладывать вблизи шин заземления (которые могут располагаться внутри траншеи), изготавливать их желательно из металла и при их монтаже заземлять с обоих концов.

**Заземление релейных щитов.** Выполнение заземления зданий, содержащих электронное оборудование, должно преследовать цель создания общей плоскости нулевого потенциала.

Для достижения этой цели шины заземления должны прокладываться вдоль стен комнат, желательно около пола.

Размер этих шин не особенно важен, но не должен быть меньше 50 мм<sup>2</sup> (для медного прута или полосы). Данный проводник образует замкнутую петлю, которая должна соединяться с заземлителем, по крайней мере, двумя проводниками того же сечения, расположенными на наибольшем расстоянии друг от друга.

Указанные ниже элементы следует присоединять к полосе заземления металлоконструкции и корпуса оборудования в пределах комнаты, к заземляющим проводникам, проложенным в кабельных траншеях, к экранам и свободным проводникам кабелей, уходящих из комнаты.

Эти элементы разрешается и даже рекомендуется присоединять к заземляющему устройству либо непосредственно, либо при помощи шины заземления, усиливая при этом бетонную арматуру.

Если несколько различных корпусов оборудования установлены в ряд, то от одной стены до другой должна быть проложена металлическая шина, объединяющая собой все указанное оборудование.

Каждая такая шина вносит свой вклад в создание многократно замкнутой сети, в свою очередь, являющейся частью общей системы нулевого потенциала.

Связь корпусов с шиной должна выполняться как можно более короткой (< 10 см). Для обеспечения ЭМС сечение проводника не важно. Достаточным является сечение от 4 до 16 мм<sup>2</sup>, выбор которого зависит от величины токов, которые будут протекать по этим проводникам, при этом следует помнить, что установка четырех

проводников сечением  $4 \text{ мм}^2$  несомненно более предпочтительна, чем одного проводника сечением  $16 \text{ мм}^2$ .

**Использование металлических конструкций в качестве сети выравнивания потенциала.** Для создания пространственной сети заземления следует объединять все кабельные несущие конструкции, лотки, стеллажи и каналы. Это означает, что для обеспечения ЭМС такое заземление корпусов оборудования или кабельных экранов более предпочтительно, чем связь с заземлителем или шиной оборудования при помощи единственного медного проводника.

Это значит, что шины заземления могут быть легко образованы из металлических конструкций, если требуемое общее эквивалентное сечение медного проводника превышает  $50 \text{ мм}^2$ , а неизолированный медный проводник сечением  $16 \text{ мм}^2$ , присоединенный к конструкции, обеспечивает электрическое соединение.

**Заземление здания щита управления.** В принципе все рекомендации, сделанные для помещений релейных щитов, применимы и к зданиям щита управления.

Однако наиболее важные щиты управления включают в себя несколько помещений с очень чувствительным оборудованием (например, компьютерами).

Этот факт вызывает необходимость проведения некоторых специфических мероприятий при прокладке кабелей и, в особенности, заземления.

Хотя в данных условиях возможно создание смешанной сети заземления (см. гл. 4), особенно если здание имеет несколько этажей, оказывается более простым и даже более эффективным создание цельной замкнутой сети, при этом шаг ячейки в помещениях с наиболее чувствительным оборудованием должен быть более чистым.

**Прокладка кабелей и выполнение заземления зданий связи.** Следует обращать особое внимание на прокладку кабелей и, в особенности, устройство заземления телекоммуникационных зданий, непосредственно примыкающих к опорным мачтам радиоантенн.

Существует, по крайней мере, три причины для подобного внимания: высокая вероятность поражения мачты молнией, большинство оборудования связи не удовлетворяет требованиям в части ЭМС, предъявляемым к оборудованию ПС высокого напряжения, использование широкополосных сигналов.

Все основные принципы, упомянутые в разд. 10.3.1 остаются в силе, при этом особенно важна концепция построения трехмерной плоскости нулевого потенциала.

Так как антенный фидер обычно входит в здание на уровне крыши, то рекомендуется устанавливать полосу заземления выше оборудования, над поверхностью потолка, вместо прокладки ее около пола (последний вариант рекомендуется в случае, если антенный фидер входит в здание на уровне земли).

Это означает, что все устройства для крепления кабелей должны размещаться на стенах вблизи потолка или на самом потолке, кабели должны прокладываться на том же уровне и попадать на различные стеллажи и вводиться в корпуса сверху.

При такой прокладке кабелей они образуют пучок (группу) свисающих с потолка помещения кабелей, не имеющих непосредственного контакта с полом.

Разделения подходящих к оборудованию кабелей на две части (заходящие сверху и снизу) следует избегать в любом случае, так как при такой прокладке образуются петли, которые могут как воспринимать, так и излучать сильные магнитные поля.

Принимая во внимание то, что токи молнии протекают с верхней части здания вниз, а для подключения радиоканалов используются коаксиальные кабели или волноводы с многократным заземлением, то единственным способом ослабить связь через

общее сопротивление и индуктивную связь является прокладка вертикальных проводников заземления по углам здания вдали от оборудования.

По тем же причинам все кабели (в частности, коаксиальные), приходящие от антенн, и поддерживающие их конструкции, следует заземлять прямо на входе в здание при помощи проводника сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ , прокладываемого по наружной стене здания и присоединенного к контуру заземления здания.

Все кабели, соединяющие здание связи с другими зданиями, следует вводить с той же стороны здания, что и кабели от мачты связи для того, чтобы избежать протекания токов молнии поперек здания.

Настойчиво рекомендуется избегать прокладки кабелей, проходящих от антенной мачты (например, коаксиальные кабели, кабели подогрева антенн и т.д.) и кабелей, трасса которых проходит внутри здания.

**Защита от ударов молнии.** Обычно принимается, что оборудование высокого напряжения и, в частности, система молниезащиты действуют и для оборудования низкого напряжения и зданий, установленных в пределах подстанций высокого напряжения, следствием чего является отсутствие необходимости установки дополнительной защиты.

Однако остается необходимость проверки эффективности этой защиты в соответствии с правилами, указанными в общих руководящих указаниях и стандартах, касающихся молниезащиты.

**Устройство оград.** По требованиям электробезопасности ограды никогда не присоединяются к контуру заземления подстанции, если только существует вероятность одновременного прикосновения к ограде и оборудованию или элементам ПС. В этом случае контур заземления следует прокладывать и за пределами огороженной территории.

**Заземление подстанций с элегазовой изоляцией.** Все указанные ранее принципы применимы и к элегазовым подстанциям.

Более детально с принципами выполнения заземления элегазовых подстанций можно познакомиться в п. 10.7.

### 10.3.2. Цепи вторичной коммутации

Цепи вторичной коммутации включают в себя низковольтные кабели, выполняющие на высоковольтных ПС следующие функции:

- измерение (ТН, ТТ);
- управление оборудованием;
- индикация, связь;
- электроснабжение собственных нужд низким напряжением (переменным и постоянным током).

**Кабельные траншеи.** Вторичные цепи следует располагать как можно дальше от источников возмущений. В частности, следует избегать прокладки параллельно с шинами высокого напряжения или вблизи них, вблизи емкостных трансформаторов напряжения и разрядников.

Кроме того, как уже упоминалось, необходима прокладка в каждой кабельной траншее заземляющего проводника сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ .

**Экранирование кабелей.** Все кабели, входящие и выходящие из здания, должны быть экранированы.

Экраны всех кабелей должны быть заземлены с обеих сторон, за исключением редко встречающихся на ПС кабелей, по которым передаются сигналы типа 2б (согласно классификации, приведенной в табл. 7.6).

Заземление следует выполнять либо на КРОССе, либо на самом оборудовании, к которому присоединяется кабель. В первом случае рекомендуется устанавливать КРОСС параллельно стене вблизи места входа кабелей и присоединять экраны непосредственно к шине заземления.

Во втором случае, в настоящее время наиболее часто встречающемся на практике, экраны присоединяются к поверхностям с высокой проводимостью, например, стенам шкафов, в месте входа кабелей. Длина проводника, соединяющего экран и корпус оборудования, должна быть наименьшей, причем наилучшим является присоединение экрана по окружности. Использование проводников длиной менее 10 см в большинстве случаев дает хороший результат.

Соединительные проводники должны обеспечивать непрерывность электрической цепи между кабелем и корпусом оборудования. Следует избегать использования для подключения заземляющих проводников одно- (двух-) штырьковых соединителей или фиксирующих устройств (замков, защелок).

Сечение проводников для заземления экрана должно быть эквивалентно сечению экрана.

**Виды экранов.** В зависимости от типа используемого экрана могут быть получены различные значения передаточного сопротивления, приводящие к различным уровням синфазного напряжения для конкретной помехи.

На ПС высокого напряжения наиболее часто встречаются следующие типы экранов, приведенные в порядке убывания эффективности действия:

1. Стальные листы (броня), навитые в виде спирали без защитного покрытия и соединенные медными проволоками для повышения электрической проводимости.

Ввиду малого шага повива коэффициент экранирования такой системы очень мал и зависит от толщины кабеля, при этом чем меньше его сечение, тем лучше экранирующее действие.

На ПС высокого напряжения такого экранирования следует избегать.

2. Стальная проволока, навиваемая спирально с шагом более 20 см.

Эффективность действия такой системы немногим лучше, чем предыдущей. Применима на частотах до нескольких сотен кГц.

Может быть достигнут коэффициент экранирования до 30–40 дБ, однако такие экраны не рекомендуются применять в частности на элегазовых подстанциях.

3. Сплошной повив медной проволокой с большим продольным шагом, дополнительно покрытый на 50 % медной лентой, навитой в обратном направлении.

Данный тип экрана может быть рекомендован к использованию, например, для экранирования кабелей, идущих от ТН и ТТ.

4. Одиночная (двойная) оплетка с высоким коэффициентом заполнения (> 80 %).

Иногда в дополнение к медной оплетке на жилы навивается пластиковая фольга с алюминиевым покрытием. При качественном выполнении оплетки может быть достигнут достаточно высокий коэффициент экранирования (> 40 дБ) даже при частотах выше нескольких МГц. Рекомендуется к применению на ПС высокого напряжения для всех типов цепей вторичной коммутации.

При прокладке в земле (кабельных траншеях) рекомендуется усиливать оплетку при помощи одной-двух медных (латунных) полос, навитых по спирали. Естественно,

что такая операция повысит не только механическую прочность кабеля, но и его передаточное сопротивление.

5. Экран из двух слоев медной ленты, навитых в противоположных направлениях с перекрытием.

Вследствие хорошего заполнения и наличия двойного слоя, коэффициент экранирования остается высоким даже при частотах выше 10 МГц. Однако относительная жесткость конструкции ограничивает ее применение в случаях, требующих использования кабелей малого размера, например, кабелей связи.

6. Сплошной экран, образованный обычной металлической трубой (из свинца или меди).

Для достижения большей гибкости медные экраны обычно гофрируются.

Сплошные экраны обеспечивают наилучшую эффективность, особенно на высоких частотах, что приводит к уменьшению противофазной помехи до нескольких десятков вольт. Рекомендуются к использованию в любых условиях, том числе на элегазовых подстанциях.

7. Многослойные экраны используются либо для достижения на низких частотах при очень низких передаточных сопротивлениях (экраны, содержащие магнитные материалы) или для получения триаксиальной системы, позволяющей одновременно выполнить несколько видов заземления экранов (например, внутренний экран заземлить на одном конце, внешний – на другом).

Все сочетания рекомендованных выше конфигураций экранов, например экраны, выполненные на основе медной проволоки или лент, усиленных стальными лентами, несомненно, повысят общую эффективность экранирования. В частности, сочетание хорошо экранированного кабеля и электрически непрерывного  $U$ -образного кабельного лотка может обеспечить получение коэффициента экранирования 60 дБ и даже более, при этом создается практически непреодолимый для помех путь при прокладке кабелей, передающих сигналы практически любого типа.

Следует указать, что в отличие от электростанций, количество кабелей на ПС высокого напряжения относительно невелико и в будущем, вероятно, уменьшится с появлением локальных вычислительных устройств и систем уплотнения.

С другой стороны, вследствие близости оборудования высокого напряжения и высокой вероятности поражения молнией, ЭМ обстановка на ПС обычно более сложная, чем на электростанциях. Поэтому большее внимание следует обращать на качество прокладки кабелей (т.е. их экранирование) на ПС высокого напряжения, чем на электростанциях. Другими словами, польза от качественного выполнения экранов кабелей на ПС более существенна, чем на электростанциях.

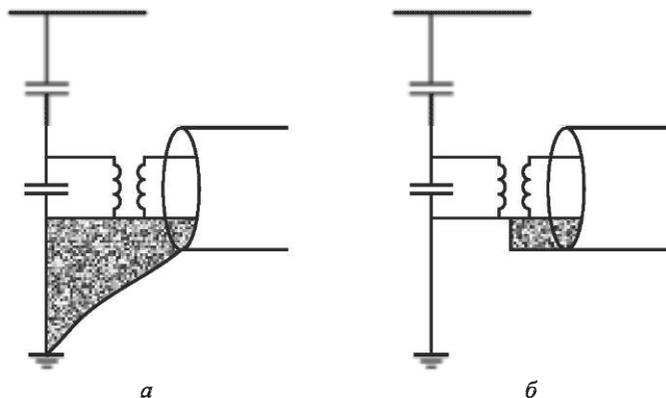
**Прокладка кабелей в пределах здания.** Кабели, не выходящие за пределы здания, могут быть не экранированы, за исключением кабелей, по которым передаются широкополосные сигналы связи (при полосе пропускания  $\Delta f > 4$  кГц или скорости более 20 кбод), аналоговые сигналы низкого уровня (при измерениях температуры и т.п.).

**Электрическая прочность изоляции.** Минимальный уровень электрической прочности изоляции между жилой и экраном зависит от многих факторов, однако, испытательное напряжение должно быть не менее 1000 В при частоте 50 (60) Гц.

**Совместная прокладка кабелей.** Как уже отмечалось, следует следить за тем, чтобы в одном кабеле (пучке неэкранированных кабелей) никогда не прокладывались цепи, по которым передаются сигналы различных типов. То же самое правило относится к цепям, разделенным помехозащищающим устройством. Примером являются входные и выходные цепи фильтров или изолирующих трансформаторов.

**Вторичные цепи трансформаторов напряжения и тока.** Следует обращать особое внимание на кабели, соединяющие ТТ и ТН с релейными щитами, так как они относятся к тем цепям, которые подключаются непосредственно к оборудованию высокого напряжения. Даже если это соединение осуществляется через понижающий трансформатор, ситуация такова, что коэффициент ослабления определяется только для промышленной частоты. Реальная передаточная функция оборудования на высокой частоте, как для синфазных, так и противофазных сигналов, мало зависит от коэффициента трансформации и сильно варьируется от одного трансформатора к другому.

Из соображений безопасности, вторичные цепи должны быть заземлены около оборудования высокого напряжения. Во избежание образования петли нулевым проводником и заземляющим проводником как экран, так и измерительную цепь следует соединять с корпусом трансформатора, а не отдельным проводником непосредственно к контуру заземления (рис. 10.8).



**Рис. 10.8 Неправильное (а) и правильное (б) заземление экрана кабеля емкостного трансформатора напряжения**

Связь между трансформаторами и релейным щитом могут выполняться отдельными двухжильными кабелями для каждой фазы или двумя четырехжильными кабелями – один для токовых цепей, другой – для цепей напряжения.

В последнем случае установка клеммной колодки вблизи трансформатора позволяет выполнить соединение и заземление различных нулевых проводников, как показано на рис. 10.9.

Нулевые проводники и экраны кабелей, входящих в клеммную коробку, присоединяются к корпусу коробки, которая в свою очередь заземляется. Подобное двойное заземление нулевого проводника (на трансформаторе и в клеммной коробке) оказывает очень небольшое влияние на уровень синфазных помех вследствие очень небольшой длины двухжильных кабелей между трансформатором и клеммной коробкой. Повторное заземление нулевых проводников на релейном щите не допускается ни при каких условиях.

Иногда следует опасаться появления двойного заземления в случае, когда два измерительных трансформатора присоединены к одному и тому же оборудованию (например, цепи синхронизации). В этом случае необходима установка разделительных трансформаторов.

В любом случае настоятельно рекомендуется включать параллельно каждому двухжильному кабелю параллельного заземленного проводника сечением не менее 50 мм<sup>2</sup>.

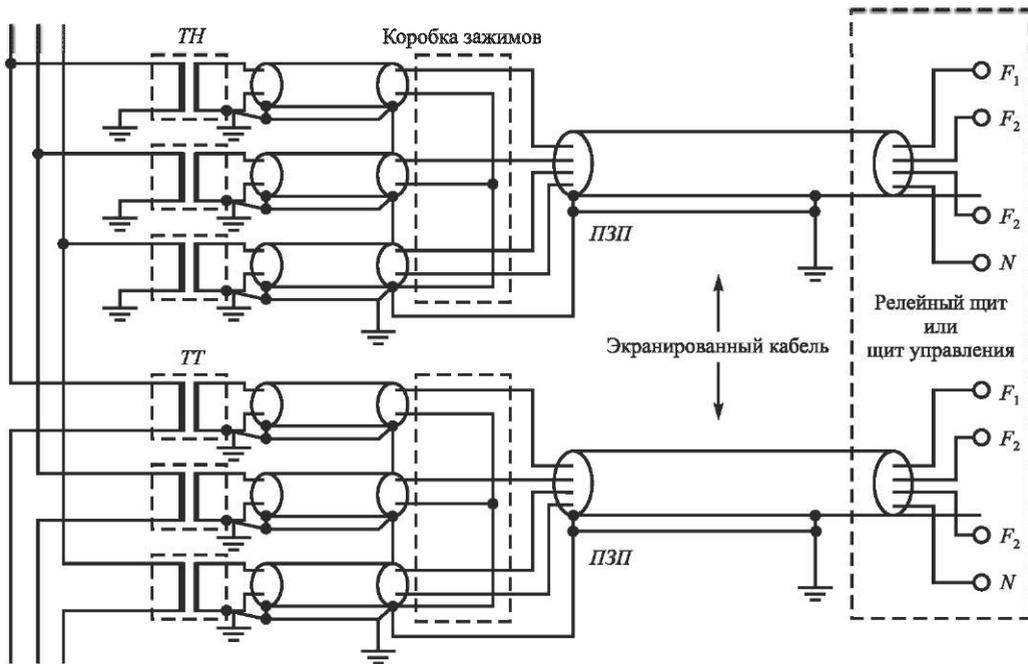


Рис. 10.9 Заземление вторичных цепей ТТ и ТН и кабелей, связывающих их с релейным щитом

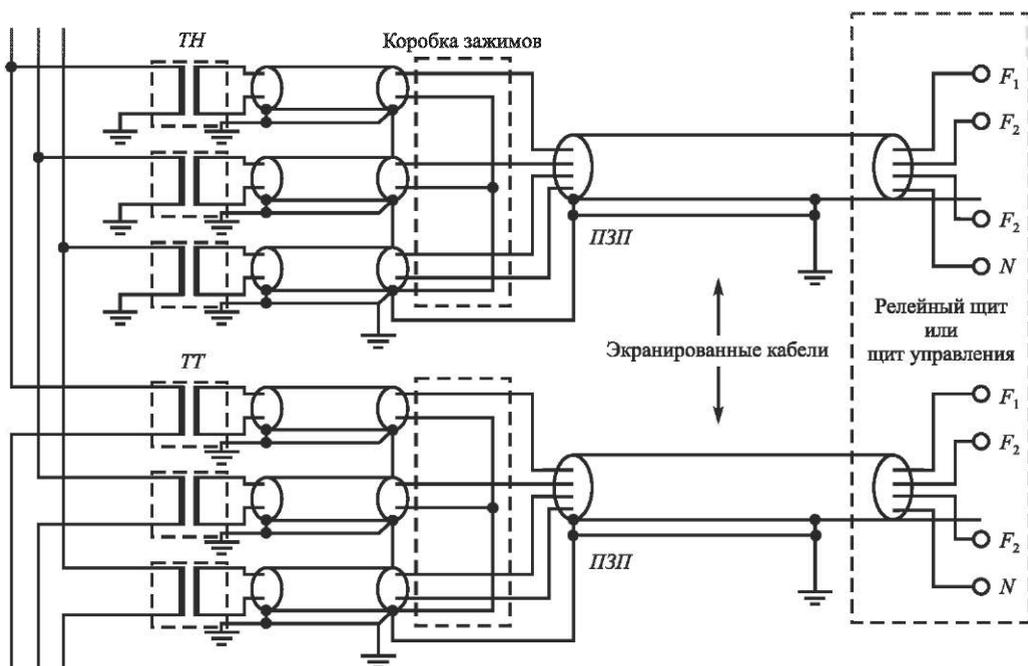


Рис. 10.10. Схема вторичных цепей ТТ и ТН, модифицированная с целью снижения появляющихся при переходных процессах противофазных помех

Если позволяют соображения электробезопасности, то при заземлении нулевого проводника в одной точке, например, только в распределительной коробке, будут получены меньшие напряжения помехи (рис. 10.10).

### 10.3.3. Экранирование зданий

Необходимость экранирования строительных конструкций может возникнуть в случаях, когда требуется защитить установленное внутри здания очень чувствительное оборудование, например компьютеры или оборудование связи.

Основными источниками возмущений, наличие которых вероятно может оправдать создание глобальных экранов, являются на высоких частотах излучение, вызванное током молнии и коммутациями в цепях высокого напряжения, и на низких частотах значительные магнитные поля вблизи силовых ЛЭП и ошиновки, способные оказать влияние на чувствительное к помехам оборудование.

Выполнить экранирование от высокочастотного излучения относительно просто, если требуется достичь разумной эффективности экранирования (см. гл. 8). Достижение очень высокой степени экранирования совершенно не оправдано, так как достаточно много помех проникает в здание через кабели.

Одним из наиболее простых и дешевых способов экранирования от ВЧ помех – это закладка в стены здания сетки из стальных прутьев (диаметром около 5 мм) с шагом 10–15 см, причем каждый прут на концах присоединяется к соседним. При подобном выполнении может быть достигнут коэффициент затухания магнитного поля от 15 до 30 дБ в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц; он зависит от качества выполнения соединений между прутьями, между прутьями и металлоконструкциями и наличия строительных проемов (окон, дверей, и т.п.).

Другой дешевый способ экранирования на ВЧ – это создание сетки из тонкой проволоки.

**Поля промышленной частоты.** Обеспечить необходимое для нормальной работы мониторов затухание магнитных полей, несомненно, более трудно. Применение стальных решеток, указанных выше, обеспечит затухание до нескольких дБ. Использование стальных пластин или листов более эффективно, но весьма сложно. Коэффициент экранирования пропорционален толщине листа и квадратному корню из магнитной проницаемости материала. При использовании стального листа толщиной 2,5 мм с относительной магнитной проницаемостью около 1000, образующего непрерывную магнитную цепь вокруг источника или приемника помех, можно достигнуть величины коэффициента затухания от 10 до 20 дБ. Если магнитная цепь не замкнута, ее магнитное сопротивление остается значительным, а значение коэффициента редко превышает 10 дБ.

Значительное улучшение экранирующих свойств может быть достигнуто при применении стали с ориентированной внутренней структурой (подобно применяемой в трансформаторах). С другой стороны, вследствие наведения вихревых токов также возможно достичь приемлемого экранирования при помощи алюминиевых или медных пластин. При одинаковой толщине пластин более эффективно применять сталь для создания экранов в непосредственной близости от защищаемого оборудования, в то время как использование алюминия более эффективно на больших расстояниях (например, нескольких метров).

Использование сплавов с высокой магнитной проницаемостью позволяет получить очень большие коэффициенты экранирования, однако их высокая стоимость ограничивает применение для защиты небольшого оборудования.

Если источником возмущения является ошиновка, то лучшим методом подавления помех является увеличение расстояния между источником и приемником помех или уменьшение расстояния между проводами различных фаз.

#### 10.3.4. Подстанции с элегазовой изоляцией

Все принципы прокладки кабелей, обсужденные ранее, могут быть применены и на элегазовых подстанциях, однако, вследствие наличия на них более сложной электромагнитной обстановки, эти меры должны быть усилены.

В частности большое значение имеет создание хорошей эквипотенциальной сети заземления или общей поверхности нулевого потенциала. Поверхность нулевого потенциала может представлять собой непрерывную стальную сетку, залитую бетоном, сетку или металлические пластины, расположенные на одном или нескольких уровнях.

Стальные прутья, внедренные в армированный бетон, могут быть использованы для создания такой поверхности и даже образовывать основу для ее создания, если размер ячейки не превышает  $5 \times 5$  м. Сеть заземления, образованная при соединении такой поверхности нулевого потенциала с классическим контуром защитного заземления должна иметь размер ячейки не более  $2 \times 2$  м.

Все металлические корпуса должны заземляться, по крайней мере, в двух точках; в частности, кабельные лотки и кабель-рост из проводящих материалов должны заземляться на обоих концах и каждый раз, когда они пересекают другие металлические элементы.

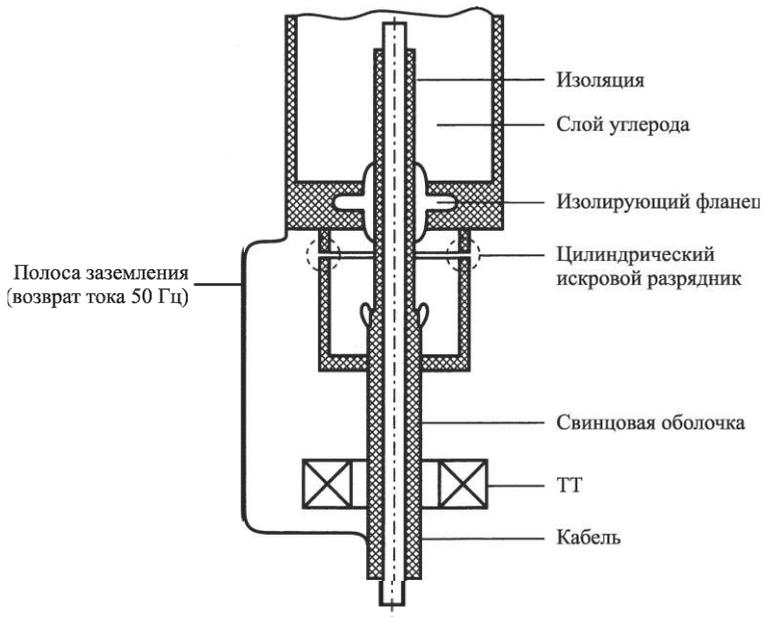
Сам корпус элегазовой подстанции надо присоединять к сети заземления у основания каждой опоры (кронштейна). Данные соединения должны иметь очень небольшую длину и по возможности выполняться при помощи нескольких проводников (3–4 штуки).

**Соединения с воздушными ЛЭП.** В местах соединения с воздушными ЛЭП металлический корпус элегазовой подстанции должен быть электрически соединен с поверхностью опорного потенциала при помощи металлических пластин площадью несколько квадратных метров (имеющих низкое сопротивление). Корпуса оборудования подстанции, имеющие трубчатую форму, присоединяются к пластине при помощи 6–8 перемычек, равномерно распределенных по его периметру.

**Соединения с кабелями.** В зависимости от того, присоединяются ли экраны кабелей к местному контуру заземления или нет, различают два случая: экран присоединен или не присоединен к местному контуру заземления. Единственный способ избежать появления помех значительного уровня – это коаксиально (соосно, по периметру) присоединить экран кабеля к корпусу подстанции. Если этого не сделать, т.е., если кабельные экраны присоединены только к контуру заземления, то разность потенциалов между экраном и корпусом может составить многие десятки киловольт (на ПС номинальным напряжением 150 кВ) и могут произойти перекрытия изоляции.

Наличие одновитковых трансформаторов тока (надеваемых на кабель) или необходимость выполнения соединения разъемным иногда влечет за собой невозможность сделать действительно соосное (коаксиальное) соединение. В этих случаях соединение следует выполнить при помощи минимум 4 коротких проводников, равномерно распределенных по окружности. Но даже в этом случае существует вероятность перекрытия, если расстояние между выводами экрана и корпусом меньше 10 см.

Для того чтобы избежать неконтролируемых разрядов, рекомендуется устанавливать на кабель кольцо (цилиндрический искровой разрядник, изображенный на рис. 10.11) с зазором между кольцом и корпусом примерно 2–5 мм.



**Рис. 10.11. Эскиз перехода кабеля в элегазовую подстанцию с установкой трансформатора тока. Показана только одна из фаз**

Подобная конструкция работает как фильтр высоких частот и пропускает разряды низкой энергии (составляющие 50/60 Гц проходят через внешнее коаксиальное соединение), не оказывая практически никакого влияния на общий уровень помех.

При необходимости можно достичь полного подавления искрения при помощи шунтирования промежутка сопротивлением в несколько ом.

Если экраны кабелей не присоединяются к местному заземлителю, то появляется необходимость установки по периметру места соединения между экраном и корпусом устройств защиты от перенапряжений (например, варисторов, конденсаторов или резисторов). Данное решение также применимо для развязывающих изолированных соединительных муфт в металлическом корпусе. Во всех случаях соединения с шунтирующими элементами должны быть как можно более короткими.

Как уже отмечалось, высококачественные экранированные кабели должны эксплуатироваться с экранами, заземленными соосно (по периметру) на обоих его концах. Следует внимательно относиться к выбору трассы прокладки таких кабелей. По всей трассе кабели должны прокладываться в надежно заземленных металлоконструкциях. Цепи разных типов, а также цепи, относящиеся к разным элементам оборудования, следует прокладывать в отдельных каналах.

### 10.3.5. Помехозаграждение

Кроме общих методов выполнения экранов и прокладки кабелей, описанных ранее, иногда возникает необходимость использования заграждений для снижения уровня помех ниже некоторого приемлемого уровня, определяемого помехоустойчивостью или, что более вероятно, электрической прочностью оборудования. Обычно это происходит тогда, когда приемные цепи проходят через границу зон с различной электромагнитной обстановкой.

Заграждающие устройства можно разделить на три группы: гальваническое разделение, ограничение перенапряжений и фильтры.

**Гальваническое разделение.** Приведем компоненты наиболее часто используемого гальванического разделения цепей:

*Электромагнитные и статические реле*, возможности которых обычно ограничены переключениями между состояниями включено/выключено при очень низких частотах (50/60 Гц) с уровнем изоляции не более 2 кВ.

*Оптрон*ы, широко распространенные (используемые как в сочетании с электронными цепями, так и отдельно) и обладающие малой стоимостью. Позволяют осуществлять передачу сигналов частотой до нескольких мегагерц и уровнем изоляции до 5 кВ. Паразитные емкости между входом и выходом оптрона (порядка нескольких пикофарад) на высоких частотах могут значительно ограничить коэффициент снижения синфазной помехи, однако в настоящее время разработаны специальные конструкции, в состав которых входит экран между входом и выходом устройства;

*Разделительные трансформаторы* – это наиболее часто используемый симметричный барьер, который легко может быть добавлен к существующей цепи без специальной подготовки и обычно не требующий подачи питания на свой выход. При помощи таких трансформаторов могут передаваться сигналы частотой от единиц герц до нескольких мегагерц, при этом уровень изоляции достигает 20 кВ и выше. Паразитные емкости между обмотками трансформатора значительно больше по величине, чем у оптрона (до нескольких сотен пикофарад), но также могут быть значительно снижены при помощи заземленных экранов.

Большинство разделительных трансформаторов имеют обмотки с выводом средней точки и поэтому могут обеспечить выполнение заземления цепей, наряду с такими возможностями, как электропитание симметричных цепей. Этот факт имеет большое значение в случаях, когда производится снижение синфазных напряжений или противофазных напряжений промышленной частоты (см. гл. 2). Кроме того, если оборудование связи имеет значительное синфазное сопротивление, то паразитные емкости трансформатора могут вызывать появление перекрытий между его выводами и заземленными элементами. В этом случае возникает необходимость заземления средней точки обмотки на стороне оборудования непосредственно или через устройство защиты от перенапряжений.

*Оптоволоконные системы*, несомненно, являются наилучшим барьером на пути помех всех типов.

Однако, если они не используются для передачи уплотненной информации (например, в локальных вычислительных сетях), то относительно высокая (с учетом оконечного оборудования) стоимость ограничивает их применение в сложных системах, требующих широкополосных каналов передачи (например, для дифференциальных цифровых защит или защит удаленных объектов).

С другой стороны, некоторые наиболее дешевые виды оптоволоконка (пластиковые) могут представлять большой интерес для применения в качестве НЧ каналов передачи данных на небольшие расстояния в случаях, когда требуется очень высокий уровень прочности изоляции (например, телефонные цепи, выходящие за пределы ПС высокого напряжения, датчики на оборудовании высокого напряжения и т.п.);

Иногда возникает необходимость применения оборудования, сочетающего в себе различные типы гальванической развязки, таких как разделительные трансформаторы и реле или оптроны, или даже оптоволоконно. Примером могут служить телефонные цепи с вызовом по постоянному току.

**Защита от перенапряжений.** Понятие устройства защиты от перенапряжений отличается от понятия гальванической развязки тем, что в срабатывании защиты ток отводится в землю и электрические характеристики передаваемого сигнала искажаются на время появления помехи (это может быть ограничение уровня напряжения, изменение величины сопротивления источника или даже КЗ). Более того, если отводимый в землю ток помехи достаточно велик, то могут возникнуть проблемы в каких-либо других цепях вследствие связи через общее сопротивление или скачка потенциала заземлителя.

По указанным причинам защита от перенапряжений может быть применена только к тем цепям, чьи сигналы допускают искажения во время возмущений. Применение подобных устройств для цепей сигналов защиты в нормальных условиях недопустимо.

Устройства защиты от перенапряжений обычно делятся на три типа (применяемые отдельно или в комбинации друг с другом): разрядники, металлоксидные варисторы (нелинейные сопротивления), лавинные диоды.

В табл. 10.1 обобщаются основные характеристики этих трех типов составных элементов.

*Таблица 10.1*

**Основные характеристики устройств,  
используемых для защиты от перенапряжений**

Характеристика	Газонаполненный разрядник	Варистор	Лавинный диод
Способность выдерживать большие токи	Высокая	Средняя	Низкая
Постоянная времени срабатывания, с	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-9}$
Защитный уровень	Высокий (зависит от формы импульса)	Любой (зависит от тока)	Любой
Динамический ЗУ/статический ЗУ отношение напряжений при импульсном воздействии к постоянному напряжению	$> 1$	$= 1$	$= 1$
Емкость	Очень мала	Большая	Средняя
Ток утечки	Нет	Есть	Нет
Старение	Невелико	Есть	Нет

Газонаполненные разрядники (грубая защита) используются в схемах, требующих защиты от очень мощных возмущений (вызванных ударами молнии или КЗ в силовых цепях).

Их минимальное статическое напряжение пробоя обычно составляет 90–300 В, в то время как динамическое напряжение перекрытия при крутизне фронта 1 кВ/мкс обычно превышает 500 В.

Из-за значительного уровня импульсных перенапряжений и больших сопровождающих токов короткого замыкания, установка таких устройств внутри оборудования не рекомендуется. Применение в качестве первичного средства защиты всей установки в месте входа кабелей в здание (помещение) даст наилучшие результаты.

Преимущество варисторов по отношению к газовым разрядникам состоит в том, что при их срабатывании цепь не закорачивается, а поведение при динамических процессах заметно лучше. По указанным причинам они широко используются, особенно в силовых цепях.

Однако большая емкость устройств ограничивает их применение в некоторых ВЧ-цепях.

Лавинные диоды не способны отводить в землю значительные токи, однако их напряжение срабатывания может быть очень низким и не зависящим от тока. Поэтому они используются главным образом в качестве подавителей помех (тонкая защита) непосредственно около оборудования или защищаемых цепей (см. далее).

*Совместное применение разрядника и подавителя помех.* Необходимость защиты чувствительного оборудования от перенапряжений вызывает необходимость применения многоступенчатых схем защиты, в которых ступень грубой защиты (разрядник), устанавливается на входе в здание для отвода тока (выравнивания потенциала), а ограничение перенапряжений осуществляется ступенями тонкой защиты (подробнее см. гл. 11).

В такой схеме для достижения цели параметры ступеней и места их установки должны быть скоординированы.

При координации следует учитывать соотношение между напряжениями срабатывания элементов, времена срабатывания и рассеиваемые энергии устройств, а также сопротивление проводов между ними и форму воздействующего импульса.

Решение данной задачи достаточно сложно.

**Фильтры.** Основная идея использования фильтров состоит в том, чтобы полоса пропускания цепи не превышала частотный диапазон, используемый передаваемым сигналом. Большинство проблем ЭМС возникают вследствие проникновения помех в оборудование через цепи и порты связи, чья полоса пропускания ничем не ограничена, а также через цепи электропитания.

Наиболее известным типом фильтра является фильтр низких частот, устанавливаемый в цепях питания большинства электронных устройств. Данные фильтры обычно выполняют две функции: подавление противофазных помех и подавление синфазных помех.

Первая функция легко выполнима (она напрямую характеризуется передаточными характеристиками фильтра), в то время как выполнение второй функции связано со сложностями, так как сильно зависит от способа его установки и подключения к оборудованию.

Единственным способом обеспечения правильного снижения синфазных помех – это установка фильтра непосредственно на входе кабеля в оборудование (или на раму или стойку, где установлено оборудование) и выполнение заземления при помощи непосредственного контакта между (металлическим) корпусом фильтра и рамой, а не (по крайней мере, не только) при помощи проводника заземления.

Качество фильтра оценивают, прежде всего, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или ее основным элементам: частоте и крутизне среза, коэффициенту пропускания в полосе прозрачности. По виду АЧХ различают полосовые (ПФ), режекторные (РФ), фильтры низких (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот (рис. 10.12).

Частота среза  $f_{cp}$  определяется на некотором уровне, например, 0,9 от максимального значения коэффициента пропускания. Крутизну среза определяют в децибеллах при двойном отклонении от частоты среза ( $0,5f_{cp}$  для ФВЧ и  $2f_{cp}$  для ФНЧ), которое называют октавой. Например, ФНЧ, имеющий  $f_{cp} = 1000$  Гц и крутизну среза  $\alpha_{cp} = 20$  дБ/окта-

ва на частоте 500 Гц имеет коэффициент пропускания в 10 раз меньше, чем на частоте 2000 Гц.

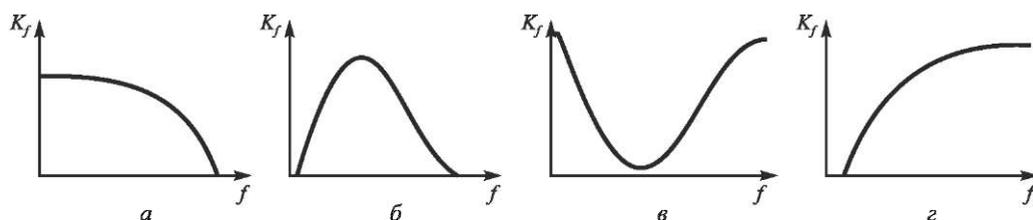


Рис. 10.12. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

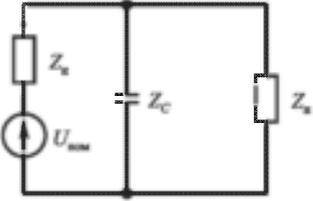
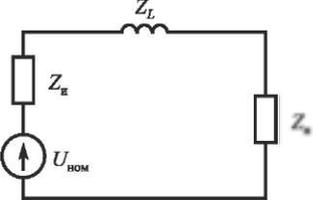
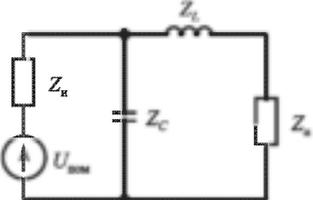
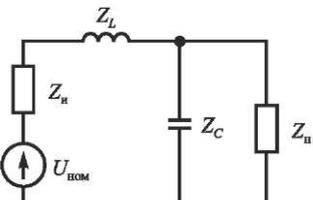
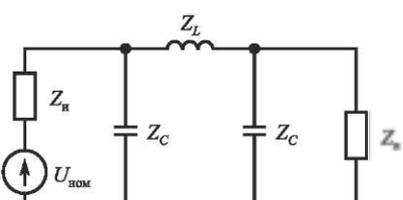
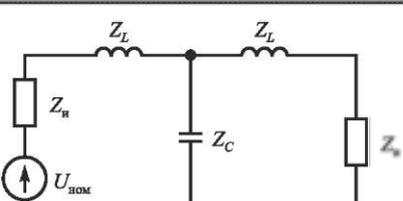
Для полосовых фильтров задают верхнюю и нижнюю частоты среза, для режекторных – центральную частоту  $f_0$ .

Все фильтры по исполнению делятся на две большие группы: пассивные и активные. Пассивные собираются из пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. В активных фильтрах наряду с упомянутыми элементами используются также полупроводниковые приборы, микросхемы с источниками их питания. Активные фильтры в свою очередь, делятся на аналоговые и цифровые. Достоинством активных фильтров по сравнению с пассивными является большая крутизна среза и большой коэффициент пропускания в полосе прозрачности, высокое входное и низкое выходное сопротивление. Во вторичных цепях подстанционного оборудования для защиты от помех в сети используют ФНЧ (табл. 10.2) и ПФ, в каналах телемеханики и связи чаще встречаются ПФ (заградительные фильтры на шинах и настроенные узкополосные фильтры присоединения к конденсаторам связи, входные фильтры в приемниках).

Принято составляющие элементы фильтров (емкости и индуктивности), как и сами фильтры, называть помехоподавляющими или защитными. Применение в качестве фильтра только одной емкости или индуктивности имеет смысл лишь в некоторых случаях. Блокировка сети электропитания емкостью эффективна тогда, когда внутреннее сопротивление источника помех и сети велико. Защита с помощью индуктивности может иметь место в другом случае, когда внутреннее сопротивление источника помех и сети мало. Г-образный фильтр с емкостным входом применяется, когда внутреннее сопротивление источника помех велико, а сопротивление сети мало. Г-образный фильтр с индуктивным входом целесообразно использовать в обратных ситуациях. Наибольшее распространение для фильтрации цепей получили П-образные индуктивно-емкостные фильтры, поскольку они при прочих практически равных показателях оказываются менее сложными по конструкции и обеспечивают достаточно высокое затухание помех.

**Помехоподавляющие конденсаторы.** Полное сопротивление конденсатора в широком диапазоне частот определяется не только его емкостью, но и индуктивностью его выводных проводников. Эквивалентная схема конденсатора может быть представлена в виде последовательного контура  $LRC$ -контура. Таким образом, каждый конденсатор имеет определенную резонансную частоту, выше которой его полное сопротивление определяется уже не емкостью, а его собственной индуктивностью. Для расширения диапазона частот, в котором полное сопротивление конденсатора не превышало бы определенной величины, необходимо уменьшить собственную индуктивность конденсатора. Кроме того, к конденсаторам, в зависимости от условий их работы, предъявляются

## Основные типы фильтров и оценки вносимого затухания

Эквивалентная схема фильтра	Вносимое подавление помех
	<p>Емкостный фильтр</p> $B_C \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_n}{Z_C}$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_C \approx Z_n / Z_C</math></p>
	<p>Индуктивный фильтр</p> $B_L \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_n}{Z_C}$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_L = Z_L / Z_n</math></p>
	<p>Г-образный CL-фильтр</p> $B_{CL}^\Gamma \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_n}{Z_C} \frac{Z_n}{Z_n} \frac{Z_L}{Z_n} \approx \frac{Z_n + Z_n}{Z_n} B_C B_L$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_{CL}^\Gamma \approx B_C B_L</math></p>
	<p>Г-образный LC-фильтр</p> $B_{LC}^\Gamma \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_L}{Z_C} \approx \frac{Z_n + Z_n}{Z_n} B_L B_C$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_{LC}^\Gamma \approx B_L B_C</math></p>
	<p>П-образный CL-фильтр</p> $B_{CL}^\Pi \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_n}{Z_C} \frac{Z_L}{Z_C} \frac{Z_n}{Z_n} \approx \frac{Z_n + Z_n}{Z_n} B_C B_{CL}^\Gamma$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_{CL}^\Pi \approx B_{CL}^\Gamma B_C</math></p>
	<p>Г-образный LC-фильтр</p> $B_{LC}^\Gamma \approx \frac{Z_n}{Z_n + Z_n} \frac{Z_L}{Z_n} \frac{Z_L}{Z_C} \approx \frac{Z_n + Z_n}{Z_n} B_{LC}^\Gamma B_L$ <p>при <math>Z_n \ll Z_C, B_{LC}^\Gamma \approx B_{LC}^\Gamma B_L</math></p>

требования в отношении влагостойкости, теплостойкости, электрической и механической прочности и т.д. Отечественной промышленностью выпускаются специальные помехоподавляющие конденсаторы типа КЗ. Эти конденсаторы имеют собственную индуктивность меньше  $50 \cdot 10^{-9}$  Гн. Однако в ряде случаев ввиду недостаточно широкой номенклатуры конденсаторов типа КЗ, а также из-за ограничений по весу и габаритам приходится применять обычные конденсаторы. Из них для фильтрации помехонесущих сетей рекомендуется применять конденсаторы типов КСО и КБГ и др. Если обычные конденсаторы применяются в цепи переменного тока, то необходимо учитывать, что их номинальное рабочее напряжение указано только для постоянного тока. Применение конденсаторов типа КЗ и обычных конденсаторов ограничено частотами 10–20 МГц. При более высоких частотах их использование, как правило, малоэффективно. Для подавления помех в области частот выше 10–20 МГц рекомендуется применять проходные конденсаторы. Эти конденсаторы (типа, например, КБП) имеют ряд особенностей, на которых следует остановиться подробнее.

Проходной конденсатор по конструкции существенно отличается от обычного. Токонесущий стержень проходит сквозь корпус конденсатора и изолируется от него при помощи фарфоровых или стеклянных изоляторов. Один торец секции припаян к токонесущему стержню, а другой по всему периметру – к корпусу, который является одним из выводов конденсатора. Для характеристики проходного конденсатора вводится параметр, равный отношению выходного напряжения (при отсутствии нагрузки на выходе) к входному току и, следовательно, имеющий размерность сопротивления.

Помехоподавляющие свойства проходного конденсатора очень существенно зависят от его размещения и способа крепления. Проходной конденсатор размещают так, чтобы входная и выходная цепи были эффективно экранированы, он должен устанавливаться на плоскости экрана, разделяющего входную и выходную цепи (рис. 10.13).

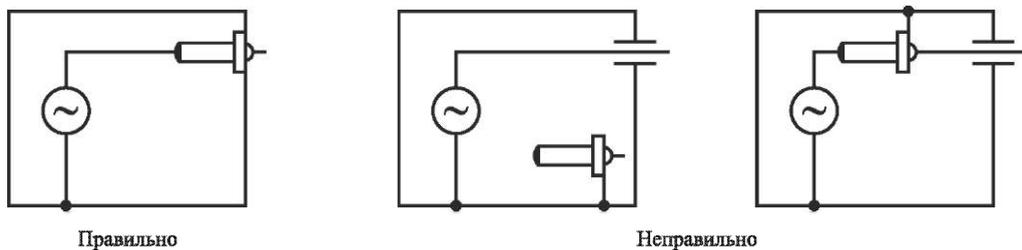


Рис. 10.13. Примеры установки проходного конденсатора

Высокие помехоподавляющие свойства проходного конденсатора в области частот выше рабочей могут быть достигнуты только при правильном его креплении, т.е. при линейном или многоточечном контакте его корпуса с экраном по всему периметру корпуса. Для крепления к экрану на корпусе проходного конденсатора имеется фланец, резьба или скоба. Проходные конденсаторы предназначены для работы в цепях постоянного или переменного тока промышленной частоты. Конденсаторы с креплением на резьбе выпускаются на рабочий ток до 10 А и номинальные напряжения постоянного тока 126, 250 и 500 В, что соответствует 50, 127 и 220 В переменного тока, номинальные их емкости 0,022–0,1 мкФ. Конденсаторы с креплением фланцем и скобой выпускаются на номинальные напряжения 125–1600 В постоянного тока, что соответствует 50–500 В переменного тока, на рабочий ток 20, 40 и 70 А и емкостью 0,022–2,0 мкФ.

В зависимости от номинального напряжения и емкости корпуса конденсаторов КБП имеет диаметр 14–40 мм и длину 55...126 мм.

**Помехоподавляющие катушки индуктивностей** могут использоваться как в качестве самостоятельных устройств фильтрации, так и в виде составных частей фильтра. Они устанавливаются непосредственно на источнике помех или вблизи него и в фильтрах нижних частот включаются последовательно в провод, по которому распространяются помехи. Качеством катушки в значительной степени определяются достоинства фильтра. Характерной особенностью работы катушек индуктивностей защитных фильтров является то, что они должны обладать достаточно большим сопротивлением в широком диапазоне частот. Однако для выполнения этого требования на низких частотах необходимо делать катушки со значительной индуктивностью и большим числом витков, в результате чего возрастает собственная емкость катушек, уменьшающая их сопротивление на высоких частотах. Применение секционированных обмоток в катушках снижает их собственную емкость, но уменьшает и индуктивность. Таким образом, следует искать компромиссное решение. Во избежание потерь надо стремиться к тому, чтобы активное сопротивление катушки было минимальным. При конструировании катушек для фильтров следует стремиться к сокращению габаритов катушки, к обеспечению большей поверхности охлаждения для ограничения нагрева, к уменьшению расхода цветных материалов. В некоторых случаях осуществляется экранирование катушек. Обычно собственная частота катушки подбирается равной средней частоте защищаемого диапазона. При этом удается добиться того, что полное сопротивление катушки не выходит за пределы допустимого значения. Чтобы частотная характеристика фильтра была по возможности равномерной в требуемом диапазоне частот, не следует применять больших индуктивностей. Как правило, индуктивность катушек не должна превышать 500 мкГн, при этом их конструкцию оформляют таким образом, чтобы собственная емкость не превышала 100 пФ. В качестве помехоподавляющих могут применяться любые катушки, имеющие необходимые частотные характеристики полного сопротивления. Катушка может быть как с ферромагнитным сердечником (дроссель), так и без него. В качестве материала для сердечника рекомендуется сталь ВЧ-2, магнитная проницаемость которой сохраняет значительную величину и в области высоких частот. Для обеспечения высокой проницаемости на высоких частотах при небольших протекающих по дросселю токах рекомендуется в качестве сердечника использовать ферриты, которые позволяют значительно уменьшать число витков и габариты дросселя.

Эффективность фильтров существенно зависит от их конструкций и от монтажа элементов. При конструировании фильтра и монтаже помехоподавляющих элементов необходимо учитывать следующие рекомендации:

- фильтр необходимо экранировать (это требование не является обязательным для емкостных фильтров, выполненных на обычных конденсаторах). Обычно экраном для фильтра служит его корпус;
- входные и выходные провода должны вводиться в корпус фильтра с противоположных сторон, а вне корпуса проходить как можно дальше друг от друга. Если у входных или выходных проводов имеется экранирующая оплетка, то она должна иметь надежный контакт с корпусом фильтра по всему периметру отверстия для ввода провода;
- большое внимание нужно уделять экранированию входных и выходных цепей фильтра, включая входной и выходной конденсаторы, особенно если эти конденсаторы являются проходными и расположены на входе и выходе многозвенного

высокоэффективного фильтра. Экранирование друг от друга средних звеньев в многосвязном фильтре цепи электропитания не обязательно;

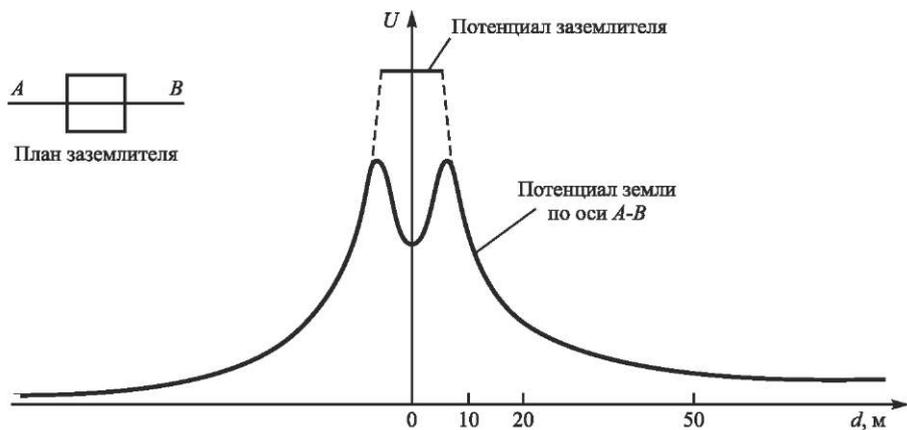
- избегать расположения элементов фильтра на съемных частях его корпуса;
- размещать проходной конденсатор следует так, как это описано выше;
- обычные и защитные конденсаторы типа КЗ рекомендуется монтировать так называемым проходным способом, т.е. присоединять помехонесущий провод непосредственно к выводу конденсатора. Если корпус конденсатора служит одним из его выводов, то крепление корпуса конденсатора на шасси или на корпусе фильтра должно обеспечить надежный контакт. Для этого корпус или шасси фильтра в месте крепления корпуса конденсатора должны иметь луженую или оцинкованную поверхность. Если один из выводов конденсатора должен быть соединен с шасси или корпусом фильтра, то это соединение должно быть выполнено возможно более коротким проводом (не длиннее 10–15 мм). Провод лучше всего припаять к шасси. При невозможности соединения вывода конденсатора с корпусом фильтра столь коротким проводом это соединение рекомендуется осуществлять с помощью шин;
- нельзя использовать выводы конденсатора для его механического крепления;
- конденсаторы, которые при отключении аппаратуры от сети питания могут оставаться заряженными, должны иметь разрядные резисторы, через которые конденсаторы должны разрядиться не позднее, чем через 10 с после выключения аппаратуры;
- в случае применения неэкранированных дросселей необходимо правильно располагать их относительно конденсаторов и подключенных к ним проводов.

Для подавления помех в диапазонах УВЧ и СВЧ обычно применяют ненастраиваемые ФНЧ. По конструкции защитные фильтры СВЧ обычно коаксиальные, а по принципу действия – поглощающие. Важное место в проектировании таких фильтров занимает выбор поглощающего материала и расстояний между его частицами в спрессованном виде, так как для этих целей в большинстве случаев используются порошковые магнитные сплавы, состоящие из металлических частиц, покрытых оксидной или фосфатной пленкой. Частицы распределены в связующем веществе типа эпоксидной смолы. Изменяя расстояние между частицами, можно изменять распределение вихревых токов, а следовательно, и затухание фильтра. Выбор параметров конденсаторов и дросселей, применяемых как в качестве элементов фильтра, так и элементов помехоподавления, производится на основании расчета фильтра. Однако произвести точно этот расчет в подавляющем большинстве случаев затруднительно, так как необходимые для расчета параметры эквивалентной схемы могут быть неизвестны. Поэтому окончательный выбор параметров дросселей и конденсаторов рекомендуется производить после экспериментальной проверки при нормальном функционировании измерительной аппаратуры и системы экранирования.

**Защита неэкранированных цепей, выходящих за пределы здания.** Удар молнии в ПС и протекание низкочастотной составляющей тока молнии через заземлитель вызывает повышение потенциала заземлителя, приблизительно равное произведению тока на сопротивление растекания заземлителя.

Если сопротивление заземлителя составляет (или превышает) 1 Ом, то потенциал легко может достичь нескольких десятков и даже сотен киловольт.

Повышение потенциала присутствует и за пределами контура заземления, где он снижается обратно пропорционально расстоянию – на расстояниях больше удвоенной величины характерного размера заземлителя (рис. 10.14).

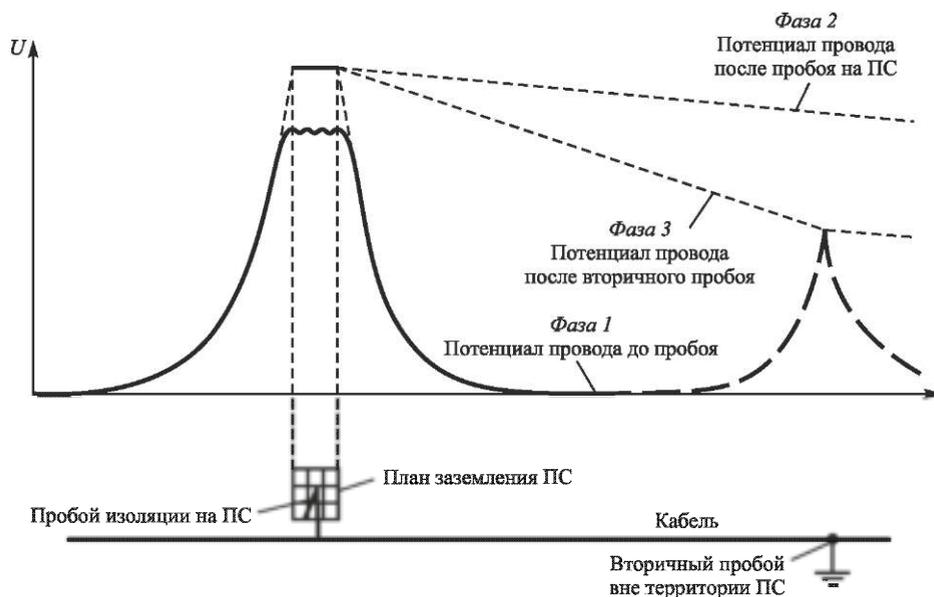


**Рис. 10.14.** Повышение потенциала заземлителя при ударе молнии в подстанцию

Результатом этого является тот факт, что любая цепь, находящаяся в зоне растекания тока, подвергается воздействию разности потенциала между жилой и заземлителем.

В частности, все кабели, приходящие на ПС, подвергаются воздействию полного потенциала заземлителя.

Если такой кабель не защищается подходящей гальванической развязкой (например, разделительными трансформаторами) или если происходит пробой (срабатывание разрядника), то его цепи получают повышенный потенциал заземлителя ПС и выносят его за пределы подстанции, создавая дополнительные места пробоя (рис. 10.15).



**Рис. 10.15.** Вынос потенциала заземлителя на территорию удаленного заземлителя

Однако на основе указанных ниже мер по снижению помех можно создать схему первичной защиты:

1. Часть кабеля, попадающая на территорию подстанции, должна иметь изоляцию высокой прочности (напряжение пробоя порядка десятков киловольт). Длина этого участка зависит от удельного сопротивления грунта, формы и сопротивления заземлителя и требуемой степени защиты; обычно длина рассматриваемого отрезка составляет от 50 до 300 м, а для очень больших электростанций может достигать 1 км.

2. Конструкция разделительных трансформаторов (или специального оборудования, например, телефонных усилителей) также должна предусматривать подобные перегрузки по напряжению.

Однако создание материалов с электрической прочностью более 20 кВ (на частоте 50 Гц) или 50 кВ (при импульсном воздействии) представляет определенные сложности вследствие наличия утечек по поверхности.

Более того, данное оборудование всегда должно располагаться внутри здания или оборудоваться нагревательными элементами для предотвращения образования конденсата.

3. Разрядники для защиты от грозовых перенапряжений с высоким напряжением срабатывания (например, 40 кВ) устанавливаются по синфазной схеме на кабельной стороне разделительного трансформатора для предохранения от перенапряжений. Данная защита может представлять собой простой воздушный промежуток (слабое место) между жилами и землей или между центральной отпайкой разделительного трансформатора и землей.

4. Газонаполненные разрядники или варисторы с нормальным остающимся напряжением (например 90 или 230 В) устанавливаются по противофазной схеме между центральной отпайкой трансформатора и клеммами оборудования на той же стороне трансформатора для защиты их обмоток и для ограничения напряжения между проводниками.

5. Устройства защиты от перенапряжений с напряжениями срабатывания, сравнимыми с уровнем прочности изоляции обычного кабеля (например, кабеля связи), или реакторы устанавливаются по синфазной схеме в месте соединения обычного кабеля и специального кабеля. Последний способ защиты не имеет значения, если сопротивление местного заземлителя слишком велико (скажем, более 10 Ом).

В добавление к указанным ранее мерам можно рекомендовать установку плавких предохранителей между разделительным трансформатором и кабелем. Это необходимо потому, что в отсутствие подобной защиты при срабатывании грозового разрядника вынос повышенного потенциала за пределы хорошо защищенной установки может вызвать серьезные повреждения в других кабелях.

Для достижения максимальной эффективности предохранители должны иметь длину не менее 10 см для снижения вероятности поддержания электрической дуги. (В действительности опыт показал, что при одновременном протекании токов больше нескольких сотен ампер и повышении напряжения больше 50 кВ, эффективность от установки предохранителей пропадает.) Однако недостатком последнего способа является разрыв цепи при перегорании предохранителя, что некоторыми приборами может не допускаться.

На рис. 10.16 приведен пример установки, выполненной в соответствии в приведенными выше рекомендациями.

Следует отметить, что все указанные меры относятся к неэкранированным кабелям или к кабелям, не имеющим гарантированно целого экрана (экрана, обладающего достаточной проводимостью), пример – телефонный кабель общего пользования.

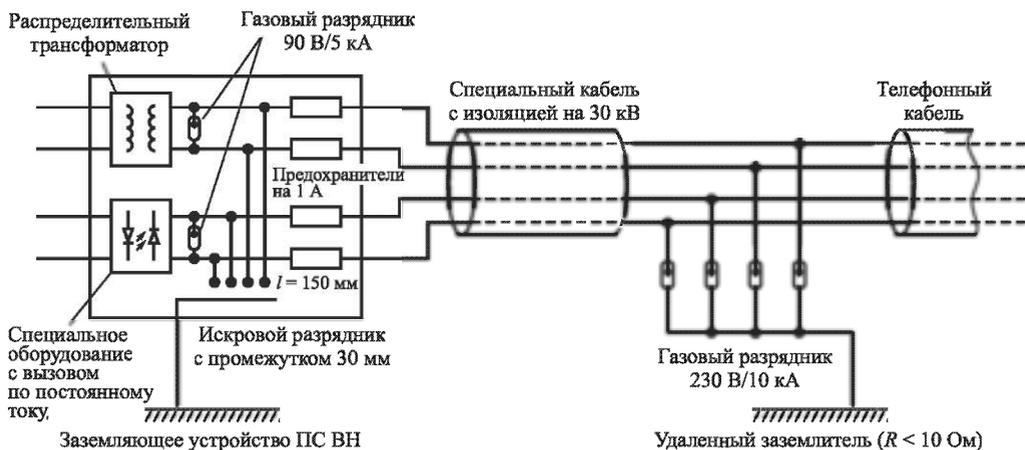


Рис. 10.16. Пример схемы защиты кабеля связи, выходящего за пределы ПС

Большинство используемых различными устройствами кабелей имеют экраны с достаточной пропускной способностью по току.

В этом случае коэффициент экранирования обычно достаточен для того, чтобы можно было использовать обычные разделительные трансформаторы, рассчитанные на средний уровень напряжений (например, 6 кВ), без дополнительной защиты.

## 10.4. Рекомендации по выполнению заземлений на электростанциях

Все материалы, рассмотренные в гл. 2 и п. 10.2. без каких-либо ограничений могут применяться по отношению к электростанциям.

### 10.4.1. Способы выполнения заземления

**Контур заземления.** Как и на ПС высокого напряжения, контур заземления электрических станций служит для выполнения нескольких функций, среди которых основными являются: ограничение напряжения прикосновения и шагового напряжения, способность восприятия токов КЗ и достижение хорошей ЭМС.

Вопреки тому, что указанные цели сильно взаимосвязаны, здесь мы будем рассматривать функцию обеспечения ЭМС, не затрагивая требования электробезопасности, регулируемые существующими национальными и международными нормами.

В частности, поперечное сечение заземляющих проводников вблизи электрооборудования высокого напряжения определяется уровнем токов КЗ на стороне высокого напряжения, при этом требуемое значение сечения медных проводников может превысить  $1000 \text{ мм}^2$ .

Для обеспечения ЭМС (включая молниезащиту) достаточными являются сечения  $100 \text{ мм}^2$  при использовании стальных полос/прутков или  $70 \text{ мм}^2$  для медных проводников.

Наружный заземлитель должен располагаться на всей площади электростанции. Шаг сетки зависит от установленного оборудования. Наружный контур заземления обычно проектируется в виде замкнутого кольца, прокладываемого вокруг каждого здания на глубине от 0,5 до 1 м.

Заземляющие проводники в фундаменте прокладываются в самом нижнем слое бетона каждого здания с шагом сетки не более 10 м.

ПС высокого напряжения, расположенные в непосредственной близости от электростанции, также должны связываться с основным контуром заземления при помощи, по крайней мере, двух проводников заземления. Это правило справедливо для всех установок (зданий, баков и т.п.), имеющих какую-либо электрическую связь с основной установкой, но не использующих тот же самый контур заземления.

**Внешние системы молниезащиты.** Системы защиты от прямого попадания молнии могут основываться на хорошо известной электрогеометрической (ЭГ) модели, которая, являясь частично эмпирической, подтверждена эмпирически. В модели учтены параметры молнии и требования электробезопасности, установленные национальными и международными стандартами.

Система защиты от прямого удара молнии состоит из молниеприемников, в которые происходят удары молнии, и определенного числа спускающихся вниз проводников (сетки), которые, кроме отвода тока молнии в землю, также действуют и как молниеприемники.

В настоящее время считают, что расстояние ориентировки  $d$  между головкой лидера, развивающегося с облака, и местом удара молнии в землю в момент, когда с земли начинает развиваться встречный лидер, связано с амплитудой импульса тока молнии в соответствии с выражением:

$$d = 9,4I^{2/3},$$

где  $d$  выражено в м,  $I$  – в кА.

Отсюда следует, что для заданного шага молниезащитной сетки справедливо следующее: чем выше ожидаемая величина тока молнии, тем выше вероятность поражения молнией сетки.

Известно, что вероятность протекания тока молнии величиной до 8 кА составляет 90 % (в среднем по планете), кроме того, электрические и электронные цепи внутри электростанции относительно просто защитить от прямого воздействия тока величиной менее 8 кА, поэтому кажется вполне обоснованным рекомендовать это значение тока молнии в качестве расчетного для выбора шага молниезащитной сетки.

Подстановка в указанную выше формулу значения тока  $I = 8$  кА дает нам расстояние  $d = 37$  м.

Упростив электрогеометрическую модель и во избежание необходимости повторения расчетов в каждом конкретном случае можно рекомендовать остановить выбор шага сетки на величине  $d$ .

На практике каждый край здания имеет молниеприемник; более того, каждый металлический объект, например, вентиляционные трубы и оборудование, паразит, стальная арматура и т.п. присоединяется к молниезащитной системе, что приводит к уменьшению действительного шага сетки до  $\sim 20$  м.

При необходимости здания, содержащие очень чувствительное оборудование (или оборудование, требующее очень высокого уровня безопасности) может защищаться при помощи системы молниезащиты с большей плотностью прокладки проводников, т.е. с шагом сетки не более 15 м.

Другие методы, например метод перемещающейся сферы, конечно же, также могут применяться для более точных расчетов систем защиты от прямого удара молнии.

Все спускающиеся вниз проводники, число которых для заданного объекта не должно быть менее двух, следует присоединять к кольцевому заземляющему контуру вокруг здания.

Кроме того, арматура бетонных стен и колонн должна иметь сварное (или другое надежное) соединение с заземлителем в фундаменте или с наружным контуром заземления вокруг здания внизу и с молниезащитной сеткой на крыше вверх. Стальные прутья могут использоваться в качестве спусков.

Правильный выбор шага сетки и числа проводников-спусков очень важен. Следует отметить, что расстояние между проводниками сетки внешней системы молниезащиты определяется не только вероятностью удара молнии при любом токе, но и также играет важную роль в определении распределения тока молнии и соответственно наводимые помехи в защищаемом пространстве.

Чем выше число проводников (спусков), тем меньше ток в каждом проводнике и тем меньше магнитное поле вблизи них.

С другой стороны, различные теоретические и практические исследования показали, что распределение тока молнии по различным ветвям системы молниезащиты происходит, грубо говоря, обратно пропорционально длине этих ветвей при условии неизменности их поперечного сечения.

Это важное утверждение может быть очень полезным при расчете ЭМ полей вблизи каждого заземляющего проводника, по которому возможно протекание тока молнии или его части.

**Защита дымовых труб.** Каждая дымовая труба должна оборудоваться двумя проводниками-спусками и, по крайней мере, одним молниеприемником.

Следует следить за обеспечением надежного соединения (не менее двух проводников сечением не менее 50 мм<sup>2</sup>) между заземлителем трубы (обычно контур вокруг трубы) и контуром основного здания.

Хотя градирни не требуют такой же степени защиты как другие здания, они также должны оборудоваться, по крайней мере, двумя (а лучше четырьмя) проводниками-спусками и кольцом из шин заземления на самом верху, к которому должна присоединяться бетонная арматура.

Защита дымовых труб и градирен по большей части имеет целью обеспечение общей защиты станции при значительных токах молнии ( $I \gg 8$  кА), чем их собственную защиту.

**Заземление внутри зданий и выравнивание потенциалов заземлителя.** Общая философия выполнения заземления, рекомендуемая для современных электростанций, основывается на создании трехмерной многократно замкнутой сети заземления по возможности с выровненным потенциалом на всем ее протяжении (подробней см. гл.4).

Очень важно отметить разработки, выполненные в данной области науки за последнее десятилетие.

Многие годы электроника основывалась на использовании низкочастотных аналоговых сигналов, а единственным типом возмущения были помехи промышленной частоты.

Поэтому естественными казались старания избежать создания петель для частоты 50/60 Гц при помощи использования радиальной схем и так называемого разделения между защитной, рабочей землей и землей для электронного оборудования.

В настоящее время с увеличением скорости работы современного электронного оборудования и повышения его чувствительности к ВЧ помехам, но также и с лучшим знанием механизмов передачи помех, данная политика в части выполнения заземления становится непригодной. Напротив, отказ от таких методов не только помогает решить

проблемы ЭМС, но и существенно упрощает прокладку кабелей и устраняет необходимость разделения различных видов заземления.

В частности, следует избегать использования отдельных сетей заземления для питания постоянным током, подключения кабельных экранов и корпусов оборудования.

Реализация на практике сети заземления с хорошо выровненным потенциалом дает гарантию того, что паразитные токи всегда будут возвращаться к своему источнику по пути с наименьшим сопротивлением (обычно, наиболее короткому пути), тем самым снижая вероятность возникновения связи через общее сопротивление, возможной при возникновении токовых петель.

В действительности создание сети с множественным заземлением не устраняет токовые петли. Однако эти петли, будучи более многочисленными и много меньшими, чем при радиальной схеме сети заземления, не являются помехой, а даже наоборот, помогают в борьбе против наведенных возмущений.

Для удобства повторим здесь ранее сделанные утверждения:

- для снижения ВЧ помех необходимо заземлять экраны кабелей в нескольких местах;
- для цепей небольшой длины указанное заземление должно выполняться на обоих концах кабеля, в то время как экраны более длинных цепей, благодаря наличию обратной цепи через распределенную емкость, иногда с достаточной эффективностью могут заземляться только на наиболее чувствительной к помехам стороне, например там, где установлено электронное оборудование;
- вследствие того, что на электростанциях многие цепи включают в себя активные элементы на обоих концах (в будущем эта ситуация станет более распространенной с увеличением числа чувствительных датчиков и заменой, частично или полностью, коммутационной аппаратуры и механизмов управления вспомогательным оборудованием на электронные устройства), возникает необходимость заземления экранов большинства кабелей (а не самих цепей) на обоих концах вне зависимости от их длины;
- планомерное заземление всех кабельных экранов (за исключением НЧ цепей с сигналами низкого уровня, например для термопар и некоторых коаксиальных цепей) требует, в свою очередь, наличия хорошей эквипотенциальной сети заземления, которая, несомненно, будет усиливаться при выполнении многократного заземления экранов кабелей.

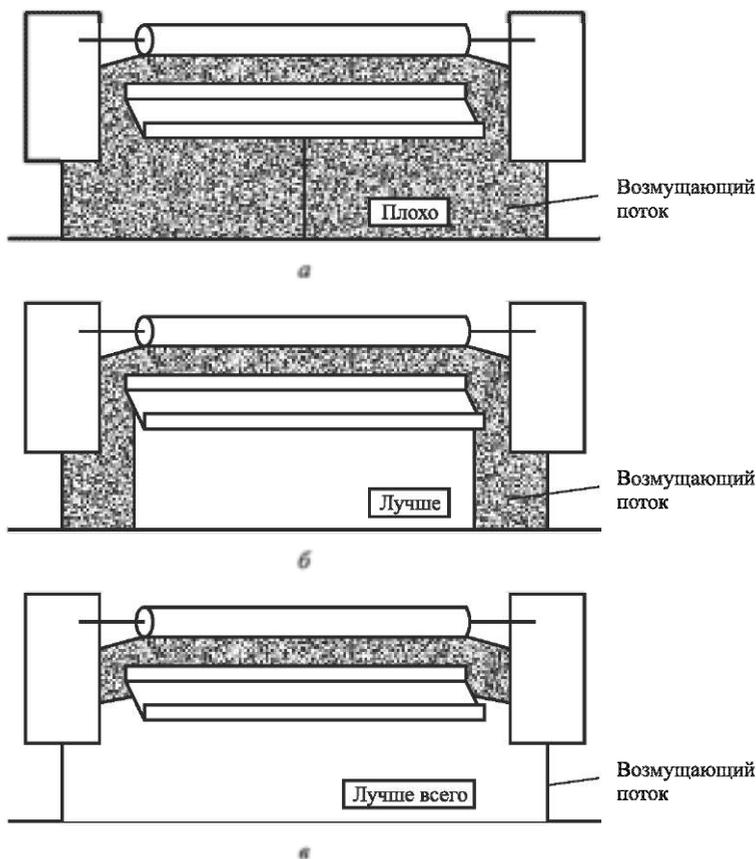
Таким образом, даже если необходимость заземления экранов кабелей на каком либо его конце отсутствует (например, потому что оборудование, установленное на этой стороне, не чувствительно к возмущениям или не может являться источником помех для другого оборудования), всегда рекомендуется применять данную практику выполнения заземления.

Для достижения хорошей эквипотенциальной сети заземления должны быть объединены все следующие элементы:

- элементы конструкции зданий, например, стальные балки и колонны;
- металлические трубы и каналы для электропроводки;
- корпуса электрощитов;
- металлические корпуса, в которых размещено электрооборудование и инструменты;
- пульты управления, кабельные лотки, вертикальные кабельные стойки, опорные конструкции и т.п.

Для кабельных лотков и другого оборудования, играющего роль защиты от помех, необходимо не только выполнить их заземление на обоих концах, но и обеспечить электрическую непрерывность на всем протяжении.

Все соединения между металлическими элементами следует выполнять помня о том, что важно не зафиксировать потенциал данных элементов, а обеспечить путь протекания токов помех по ним в том же направлении, в котором проходят цепи с полезными сигналами и, таким образом, создать наименьшее возможное расстояние между полезными цепями и цепями заземления (рис. 10.17).



**Рис. 10.17. Заземление кабельных лотков:**

*а* – неудовлетворительное выполнение; *б* – лучшее выполнение; *в* – хорошее выполнение

Другое важное замечание относится к способу соединения металлоконструкций между собой. Наилучшее соединение обеспечивает болтовое соединение с непосредственным контактом между различными элементами. При необходимости, если защитное покрытие металлических поверхностей не было полностью удалено, для создания лучшего контакта между элементами следует применять зубчатые или контровочные шайбы. Применение медных проводников-перемычек оправдано только в тех случаях, когда невозможно создание надежного прямого контакта между элементами.

В зависимости от электромагнитного окружения, зависящего от типа оборудования, установленного вблизи внешней системы молниезащиты, допускается разделение

внутренней сети заземления на зоны, имеющие различные плотности прокладки проводников.

В частности, если в отдельной комнате установлено чувствительное электронное оборудование, то может возникнуть необходимость не только выполнить надежные соединения между отдельными корпусами или между корпусами и кабельными лотками, но также обеспечить соединения (например, при помощи стальных полос) между рядами корпусов (или кабельных лотков) с некоторым интервалом, например 2 м, и затем объединить всю полученную систему с шиной заземления, прокладываемой по периметру помещения.

Указанная шина заземления может прокладываться на границе каждой защищаемой зоны и всего здания, создавая условия для выполнения многократных соединений между зонами.

Таким же образом внутренняя сеть заземления в нескольких точках (не менее 4-х) должна присоединяться к защитному контуру заземления и к наружному контуру заземления.

**Заземление цепей питания от аккумуляторной батареи.** Для обеспечения возможности обнаружения однополюсного замыкания на землю может возникнуть необходимость искусственного заземления цепей питания постоянным током (обычно в одной точке около батареи).

В этих условиях единственным способом обеспечения ЭМС на высоких частотах является систематическая установка развязывающих конденсаторов (емкостью от 10 нФ до 1 мкФ, в зависимости от нижней границы частотного спектра помех) между цепями питания и корпусом.

Однако подобные системы остаются чувствительными к токам при коммутациях (например, при замыканиях на землю). Отсюда вытекает необходимость использования преобразователей из постоянного тока в постоянный (с гальванической развязкой) в каждом отдельном блоке оборудования для обеспечения возможности искусственного местного заземления сети.

**Заземление аппаратов и систем большой мощности.** Одним из наиболее часто встречающихся возражений против создания сложнзамкнутой сети заземления является то, что при таком выполнении сети образуются замкнутые через землю петли и, соответственно, связи через общее сопротивление между чувствительными электронными элементами и оборудованием большой мощности (двигатели, электросварочные аппараты и т.п.).

В действительности это возражение не состоятельно, если были приложены соответствующие усилия для создания хорошей эквипотенциальной сети заземления при помощи связей между бетонной арматурой, металлическими балками, проводниками заземления, кабельными лотками, трубами, каналами, экранами и т.п.

Несомненно, принцип разделения остается в силе. Например, двигатель, имеющий большой ток КЗ, не должен присоединяться к тому же заземляющему проводнику, что и чувствительное электронное оборудование.

Иногда может требоваться усиление сети заземления вблизи оборудования высокой мощности.

При необходимости к чувствительной цепи или к потенциальному источнику помех может добавляться параллельный заземляющий проводник.

Более чем когда-либо следует применять следующий принцип развязки: в качественной многократно замкнутой сети заземления токи помехи будут возвращаться

к источнику по кратчайшему пути. Чем больше имеется путей для протекания тока помехи, тем меньше вероятность образования связи через общее сопротивление между источником и приемником.

## 10.4.2. Прокладка кабелей

**Внутренняя прокладка кабелей.** Внутренняя прокладка кабелей включает в себя цепи вторичной коммутации, расположенные в основном здании (управления оборудованием, работой) как показано на рис. 10.17.

Все общие рекомендации, данные для ПС высокого напряжения в общем случае действительны и прокладке кабелей внутри помещений.

Однако некоторые характерные особенности электростанций иногда могут привести к выбору других типов кабелей или их иной прокладке.

Данные особенности обобщены ниже:

- общая ЭМ обстановка на электростанциях менее сложная, чем на ПС высокого напряжения;
- благодаря большому числу взаимосвязей между металлическими конструкциями эквипотенциальная сеть заземления внутри главного здания может быть более высокого качества, чем на открытых ПС;
- число кабелей на электростанциях значительно больше, чем на подстанциях. На практике это означает, что по экономическим причинам на станциях обычно недостижим тот же уровень экранирования кабелей, что и на ПС;
- появление высокофункциональных датчиков-преобразователей и приводов приведет к увеличению децентрализации электронного оборудования и повышению необходимости выполнения многократного заземления экранов кабелей.

**Типы кабелей.** В зависимости от типа передаваемого сигнала могут быть рекомендованы различные типы кабелей:

- сигнал типа 1а (см. табл. 7.6): коаксиальный кабель или витая пара с экраном;
- сигнал типа 1б: высококачественный коаксиальный или триаксиальный кабель, по возможности защищаемый сплошной медной трубой. Иногда, во избежание возникновения резонанса, требуется использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью или с высокими потерями (ферритовый порошок, пермаллой);
- сигнал типа 2: экранированная витая пара с экраном из алюминиевых лент или алюминиевой фольги, а лучше с плетеным медным экраном;
- сигнал типа 3: экранированная витая пара;
- сигнал типа 4: многожильный экранированный или неэкранированный кабель.

Для нескольких цепей может использоваться один обратный провод.

**Применение кабельных лотков.** Прокладка кабелей в электрически непрерывных кабельных лотках может внести заметный вклад в снижение помех.

В зависимости от уровня электропроводности кабельного лотка, способа его заземления (см. рис. 10.17) и от вида лотка (открытый он или закрытый), коэффициент экранирования будет значительно меняться (от ~ 10 дБ до 30 дБ и более на частотах от 100 кГц до 10 МГц). Кроме того, кабельные лотки могут способствовать снижению взаимных помех между различными цепями.

Наилучший способ прокладки — это когда кабели, по которым передаются наиболее слабые сигналы (типов 1 и 2 согласно табл. 7.6) и кабели с сигналами больших уровней (типов 4, силовые кабели постоянного и переменного тока) прокладываются в отдельных лотках. При прокладке кабелей с сигналами разного типа в одном лотке следует предусматривать их разделение в различные пучки по типам сигнала и разведение на наибольшие возможные расстояния друг от друга.

Здесь следует отметить, что металлические кабельные лотки обеспечивают некоторое снижение взаимной связи между проложенными в нем кабелями при условии, что они не прокладываются слишком близко.

*Заземление экранов кабелей.* При наличии хорошей эквипотенциальной сети заземления большинство кабельных экранов следует заземлять через металлические корпуса тех аппаратов, к которым они подводятся.

Главное исключение из этого правила касается кабелей, по которым передаются НЧ сигналы низкого уровня, например от датчиков измерения температуры. В этих случаях экраны должны заземляться на том конце кабеля, где наблюдается наибольшая несимметрия или где заземляется сама сигнальная цепь. Если кабель состоит из отдельных экранированных пар жил, то внутренние экраны следует заземлять с одной стороны, а внешний — с двух сторон.

Кабели, присоединенные к пассивным датчикам или неэлектронным приводам (реле, двигатели), могут заземляться только на одном конце (противоположном месту установки датчика или привода). Однако на практике этого следует избегать, так как такие действия противоречат задаче создания эквипотенциальной сети заземления. Более того, при заземлении экрана в единственной точке существует риск появления резонансных явлений на низких частотах.

Длинные коаксиальные кабели также могут заземляться только в одной точке, однако необходимо учитывать емкостное ВЧ заземление для каждого присоединенного к нему элемента оборудования.

**Наружная прокладка кабелей.** Внешняя прокладка кабелей включает в себя связи с внешним вспомогательным оборудованием, а также связи с очень удаленными частями электростанции, например, дымовыми трубами, антеннами, электрофильтрами, наземными освещением.

Основной проблемой для внешней проводки, несомненно, являются удары молнии.

Несмотря на то, что наилучшим способом защиты наружных цепей является способ, основанный на создании хорошей взаимосвязи между различными контурами заземления, без выполнения дополнительных мер, таких как установка устройств защиты от перенапряжений или гальваническая развязка, гарантии полной защиты получить невозможно. Применение при этом кабелей с многократно и очень качественно заземленными экранами — необходимое условие.

Применение металлических лотков или, что еще лучше, металлических труб также значительно помогает снизить воздействие синфазных напряжений на оборудование.

Экраны входящих в основное здание кабелей следует заземлять прямо у места их входа во избежание воздействия значительных токов переходных процессов, протекающих внутри здания.

Кабели, присоединенные к оборудованию, установленному на дымовой трубе, следует прокладывать в конструкции лестничного типа, связанные с внешней системой молниезащиты здания и трубы, или в металлической трубе в земле.

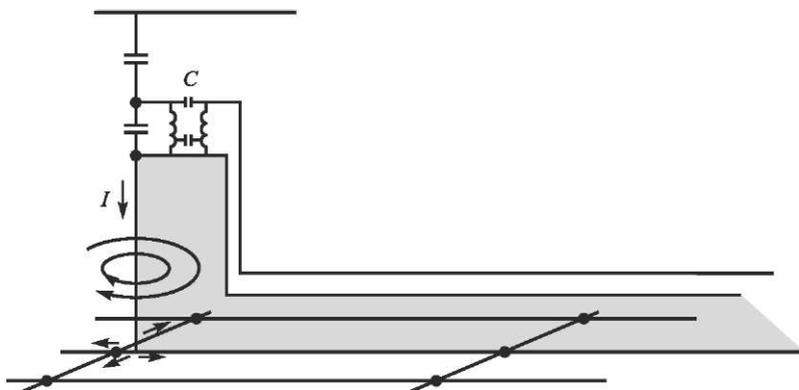
## 10.5. Особенности ЭМС на ПС высокого напряжения

### 10.5.1. Воздействия, вызываемые коммутациями, пробоями изоляции или перекрытиями в цепях высокого напряжения

**Открытые подстанции.** Уровень помех (см. гл. 3) зависит от многих параметров, среди которых наиболее важными являются:

- напряжения и токи переходных процессов, возникающих при коммутациях;
- номинальное напряжение ПС;
- взаимное положение источника и приемника помех;
- характеристики контура заземления;
- типы используемых кабелей (наличие или отсутствие экрана);
- способ заземления экранов.

Основными каналами передачи помех являются магнитная (электромагнитная) связь вследствие распространения импульсов тока и напряжения по шинам и линиям, связь через общее сопротивление (рис. 10.18).



**Рис. 10.18.** Связь через общее сопротивление и магнитная связь вследствие заземления трансформатора напряжения

Измерения электрических и магнитных полей при переходных процессах под ошиновкой и вблизи трансформаторов напряжения на подстанциях показали, что типичные амплитуды напряженностей составляют для электрического поля 1–10 кВ/м, для магнитного – 1–5 А/м. Однако в некоторых случаях были получены значения до 10 кВ/м и 100 А/м соответственно.

Спектральный состав полей определяется размерами ПС. Хотя спектр и содержит частоты до 200 МГц, но его основу составляют частоты от нескольких килогерц до нескольких мегагерц.

Длительность высокочастотных переходных процессов находится в пределах 1–10 мкс, однако они могут повторяться многократно в течение одной коммутации.

Синфазное напряжение, наводимое между выводом незэкранированного кабеля (второй конец жилы заземлен) длиной 100 м, проложенного на поверхности земли под шинами, может достигать 3–4 кВ при коммутационных операциях на ПС 150 кВ и 6–8 кВ на ПС 400 кВ.

Синфазное напряжение, наводимое на выводах экранированного кабеля с заземленным на обоих концах экраном, зависит от коэффициента экранирования (см. гл. 7) кабеля и спектрального состава помехи.

Грубо говоря, коэффициент ослабления помехи в диапазоне от нескольких десятков (для экрана из стальных проволок) до более чем сотни раз (для качественных плетеных или трубчатых экранов) может быть достигнут в диапазоне частот от 200 кГц до 2 МГц (см. гл. 7).

Ток в экране может составлять до нескольких десятков ампер.

На ПС напряжением 400 кВ наведенные синфазные напряжения в цепях, расположенных в непосредственной близости от емкостных трансформаторов или их вторичных цепей, могут превысить 10 кВ.

Наведенные в такой ситуации напряжения могут быть значительно снижены при использовании экранированных кабелей, однако достижение коэффициента ослабления, равного тем, что были указаны выше, представляется весьма затруднительным. Это связано с невозможностью уменьшения до нуля площади петли, образованной нулевым проводником, заземляющим проводником трансформатора и заземлением вторичной цепи. Более того, наличие паразитных емкостей между первичной и вторичной обмотками измерительных трансформаторов является источником появления во вторичных цепях противофазных напряжений высокой частоты, которые могут достигать нескольких кВ. В спектре помехи могут присутствовать составляющие частотой более 10 МГц, которые обычно ослабляются за счет затухания в проводах.

*Подстанции с элегазовой изоляцией.* Подстанции с элегазовой изоляцией, по сравнению с обычными открытыми ПС, обладают некоторыми принципиальными отличиями:

- размеры электрического оборудования гораздо меньше. По этой причине спектральный состав помех (большая часть которых являются следствием многочисленных отражений бегущих волн на ошиновке) содержит на порядок более высокие частоты;
- характеристическое сопротивление ошиновки элегазовой подстанции ниже того же сопротивления ОП примерно в пять раз (~60 Ом против 300 Ом).

Это приводит к значительному рассогласованию между элегазовой подстанцией и вводом от воздушной линии (или ошиновки открытой ПС).

Во время коммутаций данное рассогласование является причиной появления стоячих волн и в частности волн тока высокой амплитуды (амплитуда волны напряжения зависит от номинального напряжения ПС и сравнима по величине с указанными волнами на открытых ПС, в то время как амплитуда волны тока прямо пропорциональна характеристическому сопротивлению). В тех местах, где металлический корпус элегазовой подстанции имеет разрыв, например в месте соединения с ВЛ или кабельной линией, он становится важным источником электрического и магнитных полей более 10 кВ/м и 50 А/м (Моделирование и измерения показали, что напряженность составляет 100 В/м на 1 кВ номинального напряжения).

Если место разрыва расположено вне здания, в котором расположена элегазовая подстанция, и если экран здания обеспечивает непрерывность экрана подстанции, то этот факт не имеет большого значения.

Данная ситуация обычно имеет место в случаях с воздушными линиями. Однако, если часть ПС – открытая или если она соединена с кабелями с незаземленными (или неправильно заземленными) экранами, то это может привести к повышению уровня помех.

Следствием этих особенностей является наведение высоких потенциалов на контуре заземления и во вторичных цепях при коммутациях.

Указанные повышения потенциалов хорошо известны под не очень точным названием «подъем потенциала заземлителя при переходном процессе». Он может вызывать появление перекрытий между заземленными металлическими элементами, не находящимися в непосредственном контакте друг с другом.

Все эти проблемы проявляются более остро из-за расположения электронного и силового оборудования в элегазовой подстанции на небольших расстояниях друг от друга.

### 10.5.2. Помехи, создаваемые полями промышленной частоты

Значительное влияние электрических полей промышленной частоты (через емкостные связи) на оборудование, установленное в пределах ПС, встречается довольно редко, так как оно может быть легко ослаблено с помощью заземленных металлических экранов и, кроме того, на ПС избегают установки незаземленного оборудования.

Магнитные поля промышленной частоты также очень редко являются причиной опасного воздействия на аппаратуру ПС даже при КЗ. Однако существует одно важное исключение, а именно видеомониторы, которые могут быть чувствительны к полям напряженностью порядка 1 А/м.

Естественно, лучшим способом решения данной проблемы представляется увеличение расстояния  $x$  между источником и приемником помехи с учетом того, что напряженность магнитного поля, создаваемого током  $I$  в уединенном бесконечно длинном проводнике убывает обратно пропорционально расстоянию до провода:

$$H = \frac{I}{2\pi x},$$

а для двух или трехфазной сбалансированной системы – обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$H = kI \frac{d}{x^2},$$

где  $d$  – расстояние между проводами (размеры которых принимаются много меньшими расстояния между ними);  $k$  – постоянная, определяемая положением проводников ( $k \approx 0,2$ ).

Для цепей, расположенных в ограниченном пространстве (например, трансформатора, подстанции среднего напряжения) магнитное поле убывает практически как  $1/x^3$ , при условии, что расстояние  $x$  много больше наибольшего размера объекта.

Другой способ снижения возмущений – уменьшение расстояния  $d$  между проводами.

Если указанные меры не осуществимы, то единственным оставшимся способом (кроме замены электронно-лучевых мониторов на жидкокристаллические) остается экранирование помещений, где установлены мониторы.

Иногда оправдана активная компенсация воздействующих полей.

Кроме относительно слабого воздействия полей промышленной частоты на оборудование и аппараты, следует отметить, что индуктивная и емкостная связь – главным образом при возникновении КЗ – может являться причиной гораздо более важных проблем, связанных с такими протяженными элементами, как кабели и трубопроводы.

### 10.5.3. Помехи, создаваемые токами КЗ

Высокочастотные процессы, вызванные токами КЗ, аналогичны процессам при коммутациях. Однофазное КЗ на землю вызывает быстрое изменение напряжения на шинах с амплитудой, равной той, что возникает при коммутациях.

Основное отличие такого низкочастотного явления как КЗ состоит в протекании тока частотой 50 (60) Гц по оборудованию высокого напряжения, контуру заземления и иногда экранам кабелей (если прокладки шин и заземлителя проложены недостаточно часто). В свою очередь эти токи наводят помехи в проводах посредством индуктивной связи или через общее сопротивление.

При токе КЗ 50 кА на обычных ПС в кабелях могут наводиться напряжения до 500 В. Однако, если контур заземления и прокладка кабелей на ПС выполнены надлежащим образом, то наведенные напряжения не превышают 200 В.

Главной проблемой на ПС остаются воздействие на выходящие за пределы ПС кабели повышения потенциала заземлителя при протекании через контур тока КЗ.

**Повышение потенциала заземлителя.** При протекании по заземляющему устройству тока КЗ на землю происходит повышение его потенциала (и потенциала близлежащей почвы) по отношению к удаленной точке (см. рис. 10.14 и 10.19).

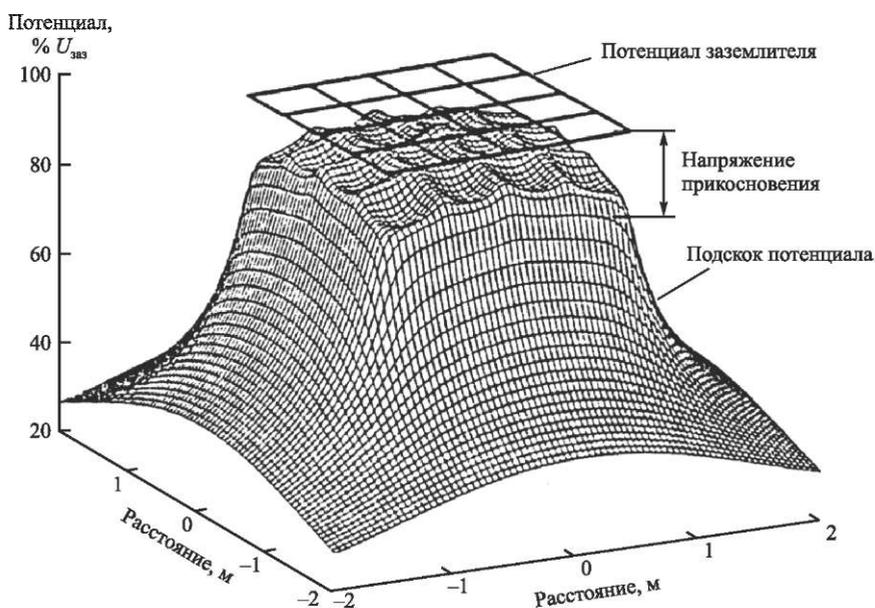


Рис. 10.19. Повышение потенциала (на частоте 50/60 Гц) заземлителя и вблизи него

На данных рисунках видно, что разность потенциалов между двумя точками одного и того же заземлителя относительно невелика. Отсюда следует, что любая цепь, расположенная в пределах заземлителя, будет подвергаться воздействию помех, главным образом, возмущений, передаваемых индуктивной связью.

Для кабелей, входящих в зону влияния, ситуация совершенно иная, так как они подвергаются воздействию продольных напряжений, равных повышению потенциала заземлителя (см. п. 10.3.5).

Потенциал заземлителя в обычных условиях равен произведению сопротивления контура  $R_3$  и протекающего по нему тока  $I_3$ :

$$U = R_3 I_3.$$

Как правило  $I_3$  меньше тока КЗ  $I$ , который представляет собой сумму следующих составляющих:  $I_a$  – ток нулевой последовательности трансформаторов ПС;  $I_b$  – ток воздушных линий без грозозащитных тросов;  $I_c$  – ток воздушных линий с грозозащитными тросами;  $I_d$  – ток силовых кабелей.

Ток  $I_3$  в земле не включает в себя составляющие, возвращающиеся к своим источникам по шинам заземления.

Для определения тока  $I_3$  можно использовать следующее выражение:

$$I_3 = I_b + I_c \frac{R_c + j\omega(L_c - M_c)}{R_c + j\omega L_c} + I_d \frac{R_d}{R_d + j\omega L_d},$$

где  $R_c$  и  $R_d$  – погонные сопротивления шин заземления и экранов (оболочки, брони) силовых кабелей;  $\omega L_c$  и  $\omega L_d$  – погонные индуктивные сопротивления различных цепей с возвратом тока через землю (около 0,7 Ом/км при частоте 50 Гц);  $\omega M_c$  – удельное сопротивление взаимной индукции между контуром, образованным заземляющим проводником и землей, и контуром, образованным замкнутой на землю линией и землей.

Для экранированных кабелей с заземленными на обоих концах экранами, наведенные напряжения  $U$  будут уменьшены с коэффициентом ослабления помехи:

$$k = \frac{RI}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)l},$$

где  $R$  – погонное сопротивление экрана;  $R_3$  – сопротивления заземлителя ПС;  $R'_3$  – сопротивление заземлителя ПС на удаленном конце (допускается, что оно не подвержено воздействию тока КЗ);  $\omega L$  – погонное реактивное сопротивление контура экран/земля (около 0,7 Ом/км при частоте 50 Гц).

С другой стороны, наличие связи между заземлителями обеих подстанций предполагает наличие тока  $I_c$ , протекающего по экрану кабеля, и выноса потенциала заземлителя на удаленный конец кабеля:

$$I_c = \frac{U}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)l};$$

$$U_3 = \frac{UR}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)l};$$

$$U'_3 = \frac{UR'}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)l},$$

где  $U_3$  – новый потенциал заземлителя;  $U'_3$  – потенциал заземлителя удаленной подстанции.

Рекомендуется проводить проверки, в частности при небольших расстояниях между ПС, превышают ли эти токи и напряжения допустимый уровень, и существует ли вероятность насыщения экранов.

Повышение потенциала заземлителя, вызванное протеканием тока однофазного КЗ, может иногда превышать 5 кВ, приводя к появлению перенапряжений в недостаточно защищенных цепях.

Более того, если параллельно воздушной ЛЭП или силовому кабелю на протяжении значительного расстояния проложен кабель связи, то протекающий ток КЗ будет оказывать на него влияние посредством индуктивной связи. Вызванные таким образом синфазные перенапряжения могут достигать нескольких кВ и определяться множеством различных факторов, среди которых находятся амплитуда тока КЗ, длина пути совместной прокладки, расстояние между источником и приемником помех и разделение токов между землей и грозозащитными тросами или оболочкой и броней силового кабеля.

**Влияние силовых кабелей и воздушных линий на линии связи.** Данный вопрос, поскольку он частично касается ПС, будет рассмотрен лишь в самом общем виде.

Для того чтобы получить общее представление о задачах, возникающих в цепях связи, приведем здесь основные положения:

- емкостная связь имеет место только между воздушными силовыми линиями и воздушными цепями связи. Она может становиться заметной, если расстояние между линиями составляют менее 50 м;
- основная причина возникновения помех – это, несомненно, индуктивная связь при КЗ. Такая связь может иметь место как с воздушными, так и подземными линиями связи.

Особое значение имеет длина зоны влияния. При воздействии на линию связи тока однофазного КЗ на ВЛ ВН с возвратом тока в земле на расстоянии менее  $200\sqrt{\rho}$  характерными являются наведенные напряжения  $10 \text{ В}/(\text{км} \cdot \text{кА})$ . Здесь  $\rho$  – удельное сопротивление земли.

Для кабелей связи, проложенных в земле вблизи силовых кабелей, наведенные напряжения могут превысить  $100 \text{ В}/(\text{км} \cdot \text{кА})$ .

Естественно, во всех указанных ситуациях может присутствовать фактор экранирования из-за наличия у воздушной линии грозозащитного троса ( $0,5 < k < 0,8$ ), экрана или параллельного заземленного проводника у подземного кабеля ( $0,1 < k < 0,5$ ) и/или экрана кабеля связи ( $0,1 < k < 0,8$ ).

Общий коэффициент ослабления помехи редко представляет собой произведение отдельных коэффициентов.

#### 10.5.4. Помехи, вызываемые воздействием молнии

В отличие от обычных коммутационных операций молния при прямом попадании в ПС может вызвать разрушительное воздействие. В этом случае будет иметь место механизм связи через общее сопротивление (например, повышение потенциала заземлителя) или прямая наводка в чувствительных цепях. Связь излучением может оказывать влияние только на уровень помех.

С другой стороны, полезно напомнить, что если длительность фронта импульса тока молнии на порядок больше, чем у токов переходных процессов, то амплитуда импульса может быть выше на порядок при одном и том же уровне помехи.

**Наводки в проводниках, проложенных вблизи проводников заземления.** Прямое индуктивное влияние тока молнии, протекающего в проводнике заземления, на цепь, проложенную вблизи него, частично обсуждалось ранее. Соответствующий уровень помех может быть оценен по выражениям, приведенным на рис. 10.3.

В зависимости от относительного расстояния между проводниками, длины зоны влияния и амплитуды тока молнии результирующее возмущение будет варьироваться в широких пределах.

Очень важное замечание, о котором следует напомнить, касается числа проводников заземления. Недостаточно только обеспечить протекание тока молнии по кратчайшему пути к заземлителю, но и необходимо разделить его на несколько частей для снижения амплитуды каждой составляющей.

**Прямой удар молнии в подстанцию.** Как и при токах КЗ, наибольший уровень помех будет в цепях, выходящих за пределы контура заземления. Принимая во внимание величину протекающих токов, потенциал заземлителя может легко достичь несколько десятков или даже сотен кВ.

Однако в отличие от случая с током промышленной частоты, даже в пределах территории заземлителя ситуация является сложной, так как потенциал сетки не может рассматриваться как имеющий одинаковое значение. Это вызвано индуктивными явлениями, учет которых необходим при повышении частоты.

Если контур заземления выполнен из изолированных проводников или проложен выше уровня земли (как в случае с сетью заземления) и на краях присоединен к идеальной земле, то чем ближе сеть к контуру, тем меньше будут наведенные в ней напряжения.

Если же контур заземления расположен в земле, то ситуация будет следующей.

Вследствие наличия рассеяния в проводящей среде ток, протекающий по каждой шине заземления, уменьшается с увеличением расстояния до места введения тока в контур. Это утверждение справедливо для любой частоты, однако, на высоких частотах увеличенное реактивное сопротивление шин приводит к тому, что ток начинает стекать с шин более интенсивно, так как распределенное сопротивление почвы становится меньше сопротивления самих шин заземления.

Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 10.20, где показан контур заземления, состоящий из одиночной горизонтальной шины, представленной сосредоточенной индуктивностью, с подключенными по краям сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , определяющими сопротивление растекания тока в почве.

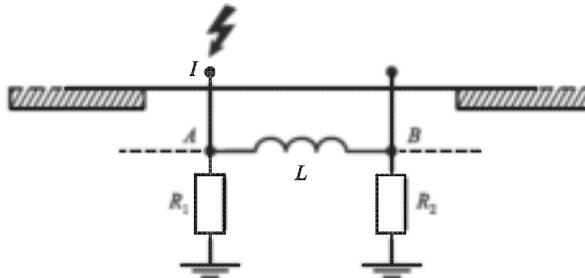


Рис. 10.20. Простейшая модель горизонтального заземлителя

Если предположить, что для низких частот

$$\omega L \ll R_1 = R_2 = R,$$

а для высоких частот

$$\omega L \gg R_1 = R_2 = R,$$

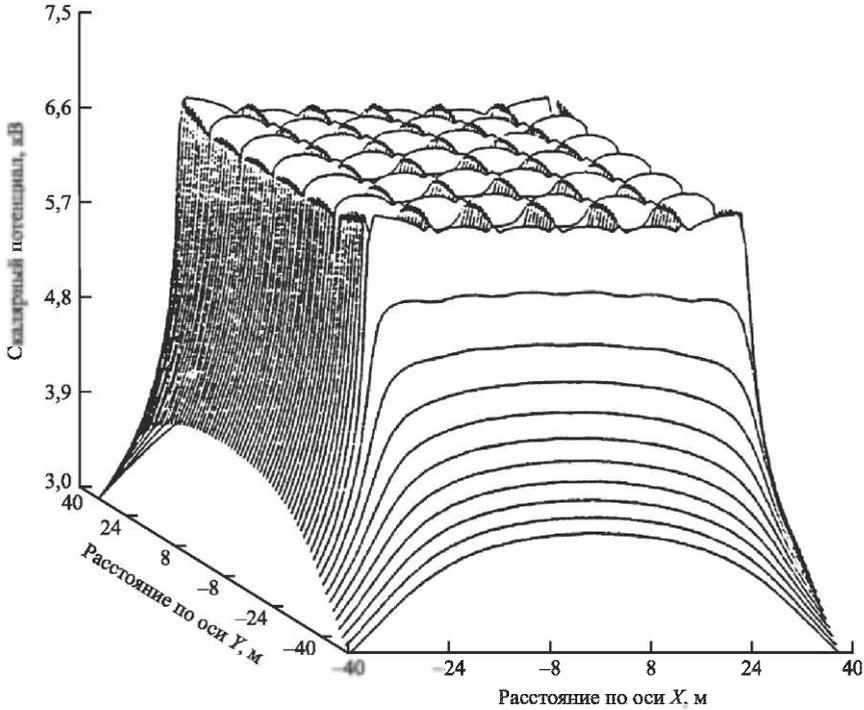
тогда потенциал точки ввода тока

$$\varphi_{\text{НЧ}} = IR/2,$$

$$\varphi_{\text{ВЧ}} = IR.$$

Отсюда следует, что в действительности распределение скалярного потенциала земли около контура заземления при высокой частоте будет иметь более высокие градиенты, чем при промышленной частоте.

Данное утверждение иллюстрируется на рис. 10.21 и 10.22, на которых приведено распределение потенциала по заземлителю, рассчитанное при введении тока 1 кА в центр сетки при постоянном токе и частоте 0,5 МГц. Сетка представляет собой квадрат размерами 60 × 60 м с шагом сетки 10 м, расположенной на глубине 0,5 м, и выполненной из медных проводников радиусом 5 мм.



**Рис. 10.21. Распределение потенциала на поверхности земли при  $I = 1$  кА,  $f = 0,5$  Гц,  $\rho = 1000$  Ом·м**

Понятие *поверхности потенциала заземлителя* проявляется здесь в полной мере, но при этом следует иметь в виду, что наряду с гальванической связью между рассматриваемой цепью и контуром заземления может существовать сильная магнитная связь.

Для пояснения этого явления добавим в схеме на рис. 10.20 новую цепь, состоящую из одиночного проводника, проложенного над поверхностью земли и заземленного в точке удара молнии (рис. 10.23).

В данной схеме синфазное напряжение  $U$ , приложенное к цепи, можно определить по формуле (в виде отображения Лапласа):

$$U = s(L - M)I_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 - sMI_2,$$

или

$$U = \Delta\phi - sMI_2,$$

где  $M$  – взаимная индуктивность между проводниками;  $\Delta\phi$  – разность скалярных потенциалов заземлителя между точками  $A$  и  $B$ .

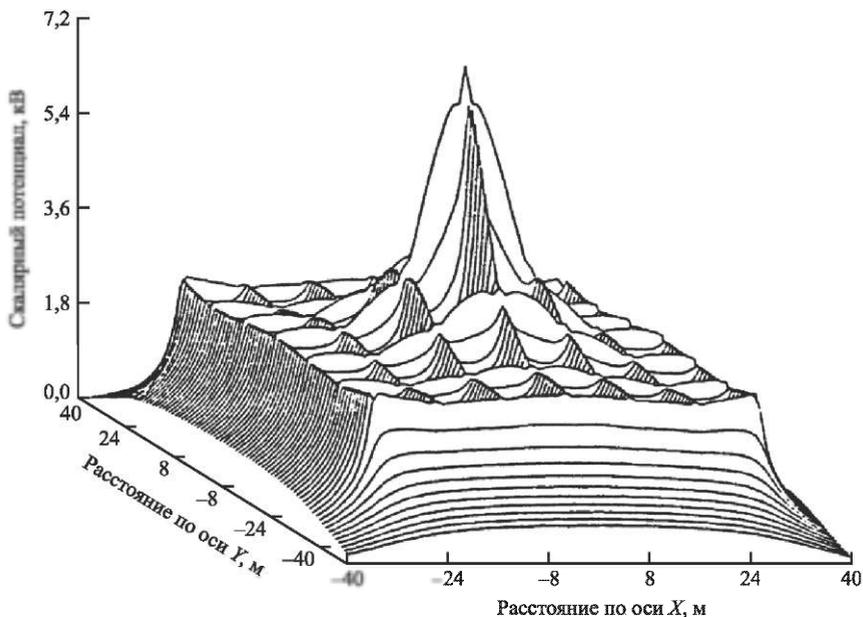


Рис. 10.22. Распределение потенциала на поверхности земли при  $I = 1 \text{ кА}$ ,  $f = 0,5 \text{ МГц}$ ,  $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  ( $\epsilon_r = 10$ ).

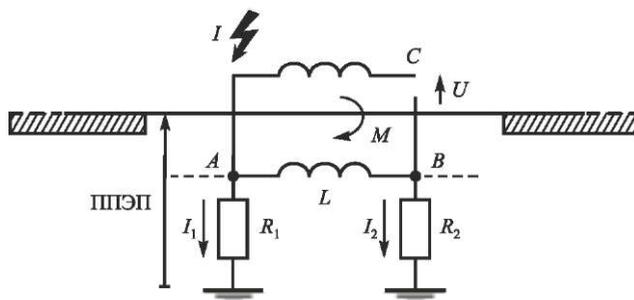


Рис. 10.23. Схема замещения горизонтального проводника

Теперь следует оценить влияние каждого из этих двух параметров. Для этого необходимо рассчитать значения  $L$  и  $M$ .

Указанные параметры могут быть рассчитаны по следующим выражениям.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right);$$

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{d+h} - 1 \right),$$

где  $a$  – радиус проводника;  $h$  – расстояние от проводника до поверхности земли;  $d$  – глубина прокладки проводника;  $l$  – длина зоны влияния заземляющего проводника, т.е. расстояние, на котором почти весь ток стекает с проводника в грунт.

Данное расстояние может быть принято равным критической длине  $l_c$ , которая будет введена далее.

Из приведенных выражений следует, что если расстояние  $d + h$  становится много большим радиуса  $a$ , индуктивность  $L$  начинает превышать взаимную индуктивность  $M$ , и напряжение  $U$  определяется, в основном, разностью потенциалов заземлителя.

Это логически правильно, так как  $L$  определяет общий магнитный поток проводника заземления, в то время как разность  $L - M$  определяет часть потока, ограниченную проводником, расположенным над поверхностью земли.

Так как магнитное поле быстро убывает с ростом расстояния до шины заземления, становится очевидным, что часть магнитного потока, оказывающая наибольшее влияние, – это та часть, которая ограничена петлей, образованной двумя горизонтальными проводниками.

Заметим, что величина

$$L - M = L_{BAC} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \ln \frac{d+h}{\sqrt{2ad}} - 1 \right)$$

является собственной индуктивностью петли, образованной обоими проводниками, принимая эквивалентный радиус проводника, расположенного в земле, равным  $\sqrt{2ad}$ .

Также очень важным является понятие зоны влияния или критической длины  $l_c$ : на самом деле, чем выше частота и меньше сопротивление грунта, тем меньше эта величина и, соответственно, тем больше будет вклад составляющей, связанной со скалярным потенциалом заземлителя, в общее напряжение  $U$  по сравнению с наведенной составляющей.

По указанным причинам, хотя синфазное напряжение  $U$  в общем случае не равно разности скалярных потенциалов заземлителя между точками  $A$  и  $B$ , но эта величина обычно принимается в качестве наибольшего возможного напряжения  $U$ .

С другой стороны, когда расстояние между источником и приемником помехи мало и сравнимо с поперечными размерами проводника или когда проводник заземления не является оголенным, находящимся в контакте с почвой (результатом чего является отсутствие стекания тока с проводника в грунт и увеличение зоны влияния по сравнению с критической длиной  $l_c$ ), другими словами, если проводник заземления является экраном кабеля или параллельным заземленным проводником, указанная выше оценка теряет силу и потенциал поверхности заземлителя более не является реальным синфазным напряжением, появляющимся на выводе заземленной цепи.

Этот вывод имеет большое значение, так как практически он означает следующее: вклад той части сети заземления, которая расположена над поверхностью земли, в снижение уровня помех не равен вкладу подземного контура заземления.

Надземная сеть заземления имеет гораздо большую роль в снижении ВЧ помех и помех, вызванных переходными процессами.

Во всех ситуациях, когда кабель защищается параллельным заземленным проводником или экраном, уровень возмущений может быть оценен после разделения задачи на три части:

- расчет (или измерения) синфазного напряжения  $U'$  в отсутствие проводника или экрана;
- расчет тока, протекающего по проводнику или экрану;
- расчет результирующего напряжения  $U$  при помощи понятия передаточного сопротивления.

Пример такого расчета приведен в [1]. Предлагаемый здесь метод оценки уровня синфазных помех с использованием теории цепей, естественно, весьма приближенный,

так как эта теория слабо подходит для расчета ВЧ-процессов в диссипативной среде. Это является следствием того, что волновые эффекты проявляются в почве на гораздо более низких частотах, чем в воздухе (на частоте 1 МГц при  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  длина волны в почве составляет 22 м, а в воздухе – 300 м).

Гораздо более строгий подход к решению данной проблемы основан на теории антенн.

Ниже приводится пример, иллюстрирующий некоторые из сделанных выводов.

В угол контура заземления, подобного тому, что изображен на рис. 10.21 и 10.22 (глубина прокладки которого в грунте с параметрами  $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и  $\epsilon_r = 9$  составляет 0,8 м), вводится импульс тока параметрами 0,25/100 мкс.

На глубине 0,3 м (рис. 10.24) прокладывается кабель, заземленный на одном конце. Рассматриваются два возможных пути прокладки кабеля: первый – вдоль проводника заземления (1–2–3), второй – напрямую от точки 1 до точки 3.

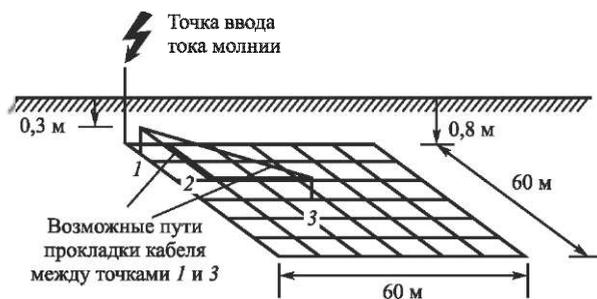


Рис. 10.24. Сетка заземления и две трассы прокладки кабеля

Синфазное напряжение (см. рис. 10.23), возникающее на незаземленном конце кабеля, может быть выражено как сумма двух составляющих:

$$U_{\Sigma} = \Delta\phi - U_1,$$

где  $\Delta\phi$  – разность потенциалов заземлителя при переходном процессе, однозначно определяемая для точек 1 и 3;  $U_1$  – напряжение, определяемое трассой прокладки и изменяющимся магнитным полем.

На рис. 10.25 показаны напряжение при переходном процессе и обе его составляющие для обеих трасс прокладки кабеля (рис. 10.25а для пути 1–2–3 и рис. 10.25б для пути 1–3).

Из рисунков видно, что (в соответствии с выводами, сделанными на основе теории цепей), помехи частично ослабляются ЭДС, наведенной изменяющимся магнитным потоком. Этот эффект усиливается, если трасса прокладки кабеля совпадает с проводником заземления.

На практике на величину и форму импульса напряжения могут оказывать влияние многие факторы.

Некоторые факторы оказывают определяющее влияние на обе составляющие напряжения. Примером таких факторов являются форма импульса тока молнии и удельное сопротивление грунта.

Некоторые факторы оказывают влияние, главным образом, на составляющую, связанную с повышением потенциала заземлителя:

- точка ввода тока молнии в заземлитель;
- плотность сетки заземлителя в месте ввода тока молнии;
- точка заземления кабеля (его экрана).

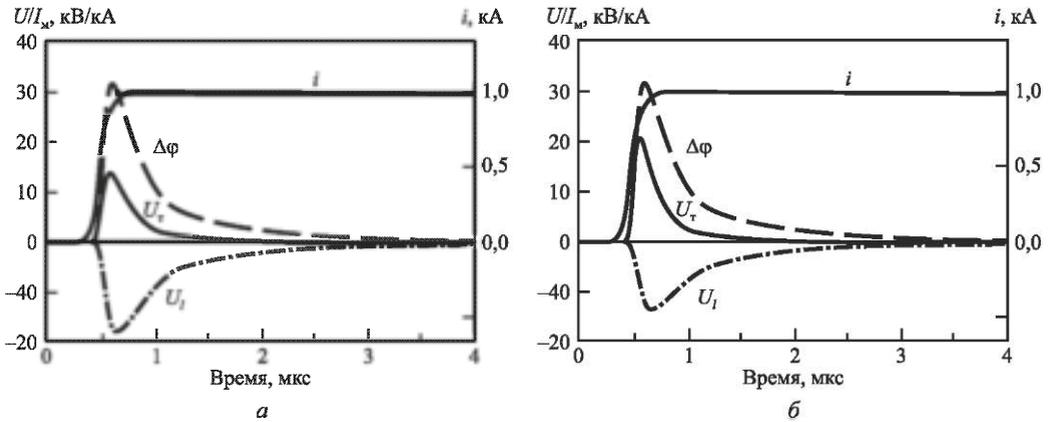


Рис. 10.25. Напряжения на незаземленном конце кабеля

Другие факторы оказывают влияние на наведенную составляющую напряжения:

- трасса прокладки кабеля;
- расстояние от кабеля до контура заземления;
- наличие параллельного заземленного провода или надземной сети заземления.

Кроме того, существует множество других параметров, которые могут приниматься во внимание: форма заземлителя и его размеры, глубина прокладки, материал проводников, наличие вертикальных электродов и т.п.

В настоящее время стало возможным проведение подробного параметрического анализа, включающего в себя варьирование указанных параметров при помощи численных методов. Примеры соответствующих программ приведены в [1].

**Прямой удар молнии в линию высокого напряжения.** Данная ситуация встречается гораздо чаще, чем прямой удар молнии в ПС. Ее последствия имеют существенно меньшее значение.

Следствием удара молнии в линию электропередачи может быть перекрытие изоляции и, вследствие этого, появление импульса напряжения с очень крутым фронтом, спектральный состав которой содержит гораздо более высокие частоты, чем импульс напряжения, вызванный самой молнией.

В этом случае уровень помех может сравняться с тем, что имеет место при пробое изоляции оборудования или коммутационных операциях на самой ПС.

### 10.5.5. Быстрые (электрические) переходные процессы, вызванные коммутациями в цепях низкого напряжения

В индуктивных цепях низкого напряжения, связанных с цепями управления выключателями или разъединителями, а также в других цепях очень низкого напряжения (12–24 В), содержащих реле, при коммутациях могут иметь место быстрые переходные процессы, амплитуда напряжения при которых может составлять несколько киловольт (см. подробнее п. 10.8).

Взаимодействие с чувствительными цепями происходит при связи через общее сопротивление в цепях питания или посредством емкостной и индуктивной связей между цепями (т.е. между жилами одного кабеля или между неэкранированными кабелями, проложенными в одном пучке).

Однако происходит довольно быстрое демпфирование помех, и уровень помех в соседних цепях ограничивается.

Наряду с электромагнитными реле, источником помех также могут быть тиристоры, коммутации тока в цепях освещения (газоразрядные лампы).

Последний источник создает гораздо более низкий уровень помех, чем реле и тиристоры.

### **10.5.6. Разряды статического электричества**

Разряды статического электричества создают помехи, встречающиеся в любых условиях.

Однако климатические условия (температура, влажность) обычной ПС, в общем случае, контролируются гораздо менее строго, чем на электростанции или в помещении щита управления. Кроме того, в пределах ПС могут перемещаться транспортные средства и мебель, поэтому считается, что вероятность возникновения разрядов статического электричества высокого уровня на ПС выше.

### **10.5.7. Возмущения, создаваемые радиопередающими устройствами**

При работе бригад оперативного управления и ремонтных бригад в полевых условиях, а также в пределах здания широко используются портативные устройства радиосвязи.

В такой ситуации часто бывает так, что эти устройства применяются вблизи чувствительного электронного оборудования, которое может оставаться незащищенным при работе с ним (например, при открытых дверцах шкафов).

Известно, что напряженность электрического поля передатчика мощностью 5 Вт может превышать 10 В/м на расстоянии 50 см и 30 В/м на расстоянии 20 см от него. Отсюда совершенно очевидно следует риск воздействия этого типа излучения на оборудование, следствием чего могут быть нежелательные отключения оборудования.

При качественной проводке кабелей возникновение связи между полями радиочастотного диапазона и сигнальными или силовыми цепями происходит гораздо реже.

## **10.6. Природа возникновения и уровни помех на электрических станциях**

### **10.6.1. Основные причины и источники возникновения помех**

Проблемы ЭМС на электростанциях по сравнению с подстанциями имеют меньшую остроту. Среди основных причин можно назвать большие расстояния между оборудованием высокого и низкого напряжений и наличие лучшего контура заземления.

В частности, удары молнии и коммутационные операции на распределительном устройстве высокого напряжения электростанции в очень редких случаях могут становиться источниками помех на самой станции, между тем они могут быть причиной серьезных воздействий на ПС высокого напряжения.

Однако, в отличие от подстанций, на электростанциях более часты случаи расположения чувствительного оборудования на обоих концах кабелей (например, электронные многофункциональные датчики на одном конце, аппаратура – на другом), что повышает требования к прокладке кабелей и выполнению их экранов.

Далее сделаем обзор основных источников возмущений на электрических станциях и при этом будем помнить, что и в данной ситуации все, сказанное ранее, относится к большинству из них (например, магнитным полям промышленной частоты, быстрым переходным процессам в сетях низкого напряжения и т.д.).

**Токи короткого замыкания.** Максимальные токи КЗ в распределительных сетях среднего и низкого напряжения обычно составляют 10–20 кА. Однако на шинах генераторного напряжения токи КЗ могут достигать порядка 100 кА (при этом являясь суммой токов КЗ от двух источников при двухстороннем питании).

Очевидно, что сетка заземлителя вблизи генераторов или трансформаторов должна усиливаться в целях удовлетворения требований электробезопасности. В частности, это означает что ток возмущения возвратится к источнику по наиболее короткому пути и не будет оказывать воздействия на цепи, не находящиеся в непосредственной близости от места КЗ.

Однако следует позаботиться об ограничении величин токов, протекание которых возможно по экранам кабелей, присоединенных к этому оборудованию. Это может быть осуществлено при помощи прокладки дополнительного проводника или применению кабельного лотка.

**Удары молнии.** Последствия удара молнии в электростанцию сильно зависят от точки удара.

Если внешняя молниезащита основного здания была выполнена правильно, то не следует ожидать значительных уровней возмущений во внутренней проводке.

Ситуация предстает в немного другом свете, если удар молнии происходит в удаленную часть электростанции, расположенную не на основной части контура заземления. В этой ситуации возможно возникновение значительного подъема потенциала заземлителя и воздействие его на некоторые специфические цепи.

**Коммутации в сетях низкого напряжения.** Наличие на электростанциях многих цепей регулирования мощности, устройств изменения скорости вращения и другого оборудования делает более высокой вероятность возникновения кратковременных повторяющихся возмущений. По этой причине необходимо обращать особое внимание на прокладку чувствительных цепей (емкостная и индуктивная связь) и на фильтрацию в силовых цепях (механизм связи через общее сопротивление).

В частности, использование отдельных кабельных лотков для кабелей, по которым передаются сигналы различных типов – это хороший способ избежать таких помех, улучшить сеть заземления (рис. 10.26).

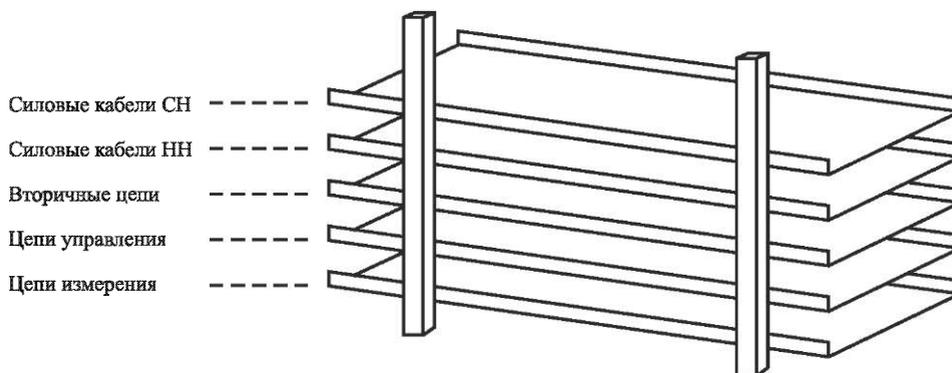
**Радиопередатчики.** Портативные радиопередатчики на ПС являются сложно определяемыми источниками помех, так как они могут присутствовать в любом месте и никак не связаны с типом ЭМ окружения.

Стационарные радиоустановки, подобные пейджинговым системам, иногда могут оказывать влияние на нормальную работу аппаратуры, в случае, если антенна установлена вблизи цепей с сигналами низкого уровня.

Маловероятно, чтобы создаваемые ими поля радиочастотного диапазона оказывали непосредственное влияние на отдельные элементы аппаратуры, например, интегральные схемы, транзисторы, диоды и т.п., однако они будут оказывать влияние на различные

проводники, а наводимые напряжения и токи будут оказывать нежелательные воздействия на электронные модули и оборудование, среди которых можно назвать:

- датчики температуры (искажение выходных данных);
- системы управления (ложные срабатывания);
- передатчики сигналов (выдача сигналов неправильного уровня);
- нарушение стабильности уровня напряжения, выдаваемого электронными источниками питания.



**Рис. 10.26.** Пример расположения лотков для прокладки кабелей различных типов. Лотки должны быть гальванически связаны с заземленными вертикальными рейками

В большинстве аппаратов рабочие сигналы представляют собой сигналы постоянного тока или переменного тока низкой частоты, а диапазон воздействующих РЧ помех не совпадает с их рабочим диапазоном. Однако наведенные помехи радиочастотного диапазона могут оказывать нежелательное воздействие посредством различных механизмов связи. Может иметь место:

- перегрузка усилителей с большим коэффициентом усиления;
- выпрямление напряжения РЧ диапазона нелинейными элементами (например, полупроводниковым переходом) и последующее создание помехи в виде выпрямленного напряжения или тока;
- демодуляция модулированного сигнала на полупроводниковом переходе и последующее создание напряжения помехи низкой частоты;
- кратковременные воздействия при включении или выключении передатчика.

**Связь в пределах корпусов оборудования.** Поля радиочастотного диапазона от локальных передатчиков могут проникать в пределы корпуса оборудования с очень небольшим затуханием в случае, если корпус выполнен не из металла или если размеры отверстий превышают  $1/10$  часть длины волны в металлическом корпусе или если боковые стенки металлического корпуса имеют плохой контакт друг с другом.

**Связь через сигнальные кабели.** Скорее всего, проникновение полей РЧ диапазона в аппаратуру через сигнальные кабели является преобладающим видом воздействия во многих, подверженных помехам установках, так как воздействие осуществляется на наиболее чувствительные порты системы. В частности это справедливо, если используются сигналы низкого уровня без фильтрации или промежуточного преобразования входного сигнала. Даже в случае с симметричными усилителями, когда наводка РЧ диапазона является синфазной помехой, помеха все равно может иметь место, так

как ослабление синфазной помехи активного устройства обычно уменьшается на высоких частотах и/или при высоких уровнях снижаемых синфазных напряжений.

К счастью, кабели общего применения для аппаратуры обычно выполнены из диэлектрических материалов, имеющих значительные потери на ОВЧ и УВЧ, вследствие чего в них происходит существенное затухание на этих частотах. Затухание в проводнике кабеля длиной 10 м на частоте 30 МГц может составить 10 дБ, на частоте 100 МГц – 20 дБ, и на частоте 400 МГц – около 60 дБ.

По этой причине, а также благодаря наличию металлических корпусов и других экранирующих элементов место и зона действия излучаемых полей в общем случае будут определяемыми, а помехи – незначительными.

Однако для рассматриваемого частотного диапазона (до 470 МГц) большинство проводников заземления, связанных с электронным оборудованием, являются электрически длинными.

В частности, везде, где соединение между экранами кабеля и корпусами оборудования выполнено не коаксиально (по периметру), существует вероятность возникновения помехи.

В подобной ситуации находятся цепи датчиков (например, датчиков давления), подключенных к оборудованию сигнальными цепями на 4–20 мА и с удаленным питанием постоянным током. Наведенные в обмотках датчика напряжения величиной порядка нескольких вольт могут с легкостью вызвать срабатывание преобразователя и изменить значение постоянного тока в цепи.

Следует отметить, что некоторые сервоприводы также очень чувствительны к помехам подобного рода.

По указанным причинам максимально допустимая мощность ручных радиопередатчиков ограничена уровнем 200 мВт или еще меньше (на атомных электростанциях), а в некоторых странах они полностью запрещены.

### 10.6.2. Другие источники воздействий

**Сварочные аппараты.** Среди других возможных источников помех следует отметить электросварку, которая, наподобие КЗ на частоте 50/60 Гц, может вызывать протекание значительных токов по сети заземления. Однако, вопреки широко распространенному мнению, решением проблемы является выполнение сети заземления в виде многократно замкнутой, а не радиальной сети для создания кратчайшего пути возврата тока источника возмущения и снижения вероятности возникновения связи через общее сопротивление.

Кроме НЧ помех данного типа, сварочные системы вследствие возникновения ВЧ колебаний при работе сварочных пистолетов плазменного типа могут являться источниками излучения.

**Радары.** На самом конце спектрального диапазона помех находится излучение радара.

Так как электростанции обычно располагаются вблизи загруженных водных путей, вероятность воздействия радаров на электронное оборудование ПС не является такой уж маленькой.

Хотя нам не известно о практических случаях воздействия помех такого типа на оборудование электростанций, в практике работы микроволновых радиосистем встречаются случаи возникновения помех, связанные с прохождением судов по водным артериям вблизи объектов.

### 10.6.3 Уровни испытательных воздействий на оборудование ЭС и ПС

В п. 10.2 и 10.4 сформулированы основные положения, касающиеся прокладки кабелей и связанные с этим способы снижения помех, на основе описаний источников помех, приведенных в гл. 3, и путей передачи помех на восприимчивые к ним цепи (гл. 2).

Ранее были проанализированы возможные уровни возмущений в цепях различных типов.

Настоящий раздел является естественным продолжением предыдущих в части попыток оценить максимальный уровень возмущений, воздействующих на оборудование, и сопоставить его с испытательными воздействиями.

Электромагнитная обстановка зависит от природы возмущений, механизмов их передачи, места расположения оборудования и способов его подключения к другим устройствам.

По указанным причинам информационная связь между оборудованием осуществляется при помощи портов. Дать точные значения ожидаемых уровней помех невозможно вследствие наличия огромного числа влияющих факторов. По этим причинам предпочтение отдается подразделению уровней помех на несколько классов, после чего становится возможным создание спецификаций на тесты по помехозащищенности.

Нормы ГОСТ выделяют 4 класса ЭМО окружающей среды.

В соответствии с рекомендациями МЭК, можно выделить 5 (или 6) классов ЭМО от 0 класса (очень хорошо защищенного от помех объекта) до 4 класса (объект подвергается многим возмущениям) или даже специального класса X.

Помехи на сигнальных портах оборудования подразделяются на 4 класса (см. рис. 10.1 и 10.2) и табл. 10.3.

Таблица 10.3

#### Классификация сигнальных портов оборудования по уровням воздействующих помех

Класс	Характеристика объекта	Место присоединения порта
A	Защищенный объект	Оборудование, установленное в том же защищенном помещении с применением специальных способов подавления помех
B	Местное воздействие на объект	Имеется другое оборудование, расположенное в том же здании, кроме технологического или расположенного вблизи оборудования с высоким напряжением
C	Объект находится в полевых условиях	Имеется другое оборудование, расположенное в пределах того же контура заземления, кроме оборудования с высоким напряжением
D	Оборудование высокого напряжения	Имеется оборудование высокого напряжения, сеть связи или оборудование, расположенное на другом контуре заземления

В данной классификации не делается никаких различий относительно того, где установлено само оборудование – на электростанции, подстанции или в других условиях. Это связано с тем, что многие источники кондуктивных помех (молния, быстрые переходные процессы в цепях низкого напряжения) не ассоциируются с конкретным видом

установки, а также потому, что методы снижения помех, в общем случае, применяются в условиях, где источники возмущений хорошо известны (например, быстрые переходные процессы при коммутациях в цепях высокого напряжения подстанций).

Ранее было сделано допущение о том, что воздействующие на оборудование возмущения на ПС высокого напряжения могут быть сильнее, чем в других местах, но при этом не должны зависеть от места расположения оборудования в пределах ПС, электростанции и т.д. Кроме того, предполагалось, что для цепей питания, по сравнению с другими цепями, ЭМО является более сложной, но, опять же, не делалось никаких различий относительно места расположения установки, так как предполагалось, что для всего оборудования установки система электропитания общая.

Для получения общего представления о вероятных уровнях помех в табл. 10.4–10.6 приводятся некоторые типовые испытательные воздействия, используемые при сертификации оборудования.

Приводимые данные включают в себя некоторый запас по отношению к действительному уровню помехоустойчивости не только потому, что они являются тестовыми величинами, но и потому, что их выбор основан на допущении того, что часто используется минимальный набор методов снижения помех.

Также важно не путать классификацию ЭМ обстановки, относящуюся к оборудованию (входным/выходным цепям), с уровнями воздействий при испытаниях на устойчивость к условиям среды, которые для каждой цепи в разных тестах могут отличаться друг от друга.

Таблица 10.4

**Уровни воздействий при типовых испытаниях  
сигнальных входных/выходных цепей**

Класс	Переменное напряжение частотой 50/60 Гц, В	Грозовой импульс, кВ	Напряжения, вызванные колебательными переходными процессами, кВ	Напряжения, вызванные быстрыми переходными процессами, кВ	Разночастотные напряжения, В
B	100	1	—	1	10
C	300	2	1	2	10
D	300	4	2.5	4	10

Таблица 10.5

**Уровни воздействий при типовых испытаниях  
силовых цепей питания переменным и постоянным током**

Объект	Грозовой импульс, кВ	Напряжения, вызванные колебательными переходными процессами, кВ	Напряжения, вызванные быстрыми переходными процессами, кВ	Радиочастотные напряжения, В	Перерывы электропитания, с
Электростанции	2	1	2	10	Переменный ток – 0,1;
ПС высокого напряжения	4	2.5	4	10	Постоянный ток – 0,05

**Уровни воздействий при типовых испытаниях экранирующих свойств корпуса оборудования**

Объект	Напряженность магнитного поля частотой 50/60 Гц при переходных процессах, А/м	Постоянное магнитное поле, А/м	ВЧ магнитное поле при переходных процессах, А/м	Поля радиочастотного диапазона, В/м	Разряд статического электричества через искру, кВ
Электро-станции	100	100	30	10	8
ПС высокого напряжения	1000	100	100	10	15

## 10.7. Некоторые особенности проектирования заземляющих систем комплектных КРУЭ

### 10.7.1. Общие положения

**Габариты.** Поскольку площадь, занимаемая КРУЭ, обычно составляет лишь 10–25 % от площади открытых подстанций, достичь требуемого сопротивления заземления становится труднее. Более того, отдельные элементы оборудования находятся ближе друг к другу, что требует сетки высокой плотности, т.е. большего числа проводников в заданной области. Это обстоятельство позволяет снизить сопротивление заземления, но не является экономически эффективным путем, поскольку увеличение площади контура заземления более эффективно, чем увеличение числа проводников на единицу площади. Следовательно, в последствии может оказаться необходимым применение дополнительных методов достижения необходимого сопротивления заземления.

**Переходный потенциал корпуса.** Переходное напряжение корпуса, возникающее в результате протекания высокочастотных токов по корпусу, появляется за счет протекания высокочастотных токов, а не токов промышленной частоты. Это напряжение возникает при ударах молнии, срабатывании грозозащитных разрядников, замыканиях на землю и повторных закипаниях разряда между контактами при коммутациях, в основном, при отключениях. Они появляются под действием токов, протекающих через систему заземления и емкости КРУЭ, и могут иметь времена нарастания от 3-х до 20-ти наносекунд, но длятся не более 20–30 миллисекунд.

Высокочастотные токи вызывают локальные повышения потенциала за счет относительно высокой индуктивности обычных заземляющих проводников, например один метр прямого медного стержня имеет реактанс порядка 60 Ом на частоте 10 МГц, тогда как на частоте 50 Гц этот реактанс составляет порядка 0,003 Ом. Поэтому соединения должны быть короткими и прямыми настолько это возможно, так как изгибы медных проводников также приводят к возрастанию реактивных сопротивлений на высоких частотах.

**Разрывы.** Все КРУЭ содержат преднамеренные разрывы корпуса, с целью предотвращения протекания электрического тока на одной секции в другую, которые, однако, позволяют высокочастотным процессам распространяться за пределы КРУЭ.

Разрывы существуют в местах трансформаторных или реакторных вводов; кабельных муфт; изолированных фланцев, применяемых для установки внешних трансформаторов тока (ТТ), устанавливаемых вокруг металлического корпуса; соединения фланцев с корпусом; устройств мониторинга; вторичных обмоток измерительных трансформаторов.

В некоторых проектах корпусов КРУЭ основные фланцевые соединения делаются с применением изолирующей прокладки. В этом случае должны приниматься специальные меры для предотвращения появления искр в разрывах, которые могут вызвать срабатывание сигнализации у оперативного персонала.

**Экранирование.** Переходное напряжение корпуса электромагнитным путем воздействует на защитные, управляющие и коммуникационные цепи. Если заземление недостаточно эффективно, высокочастотные напряжения на корпусе КРУЭ могут достигать 50 кВ, что делает необходимым экранирование защитных, коммуникационных и управляющих кабелей, присоединенных к корпусу КРУЭ и отделение их от корпуса везде, где только возможно.

**Воздействия на персонал.** Появление на КРУЭ переходных повышений напряжения часто ставит вопросы, касающиеся безопасности персонала, имеющего доступ к подстанции. Однако переходное повышение напряжения представляет собой короткое неэнергоемкое явление и до сих пор не было оснований предполагать, что оно напрямую опасно для персонала, работающего на КРУЭ.

Возникновение искр в местах разрывов во время коммутаций может вызвать испуг работников и тем самым причинить им вред. Следовательно, представляется целесообразным ввести предупреждения, ограничивающие доступ персонала во время коммутаций.

### 10.7.2. Проектирование заземляющих систем КРУЭ

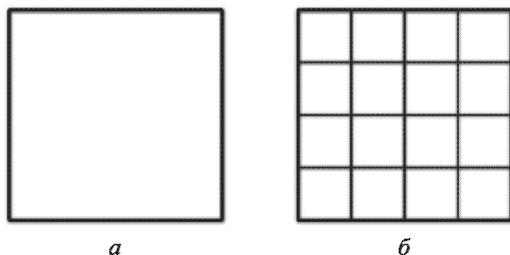
**Проектирование контура заземления.** Контур заземления предназначен для создания пути малого сопротивления для токов замыкания, а также для высокочастотных токов, возникающих из-за переходного повышения напряжения.

Перед проектированием контура необходимо выяснить наибольший ток замыкания на землю, проводимость грунта и наибольший допустимый потенциал земли, после чего не сложно рассчитать необходимое полное сопротивление заземления. Например, если наибольший допустимый потенциал составляет 650 В, а ток замыкания – 10 кА, полное сопротивление заземления должно быть менее 0,065 Ом. Указания по этому вопросу имеются в многочисленных национальных и международных стандартах. Для оптимизации конструкции контура заземления написаны компьютерные программы.

Обычно, на открытых подстанциях обеспечить достаточно низкое сопротивление заземления можно с помощью неизолированной медной рамки, проложенной по периметру подстанции, и внутренними проводниками для подключения различных элементов оборудования. Однако меньшая площадь, занимаемая КРУЭ, приводит к тому, что размеры контура будут меньше и, следовательно, могут потребоваться дополнительные мероприятия.

**Различная структура сетки.** Увеличение суммарной длины проводников, проложенных внутри одиночной рамки, снизит сопротивление сетки, но не прямо пропорционально увеличению длины, см. например, рис. 10.27.

Однако стремление обеспечить частые и короткие соединения между близко расположенными элементами оборудования служит дополнительным *стимулом для прокладки сетки высокой плотности.*



**Рис. 10.27. Различная структура сетки:**

- a* – суммарная длина проводников 55,2 м  
(относительное сопротивление  
0,0518 Ом/Ом · м при частоте 50 Гц);
- б* – суммарная длина проводников 138 м  
(относительное сопротивление  
0,0419 Ом/Ом · м при частоте 50 Гц)

**Соединения с железобетонным фундаментом.** Если используется сплошное железобетонное основание, то соединение железной арматуры с контуром заземления безусловно приведет к снижению полного сопротивления заземления и обеспечит лучшее выравнивание потенциала внутри основания и по поверхности пола. Желательно, чтобы стержни арматуры были соединены друг с другом. Это мероприятие влечет за собой ряд практических затруднений, например, необходимость осуществления заземления через бетонное основание и требование исключения нежелательных контуров высокочастотного тока. Возможно положить сетку сверху бетонного основания, но это увеличит сопротивление заземления, потому что сетка не будет проложена в земле.

Применение вертикальных заземляющих стержней. Снижение сопротивления заземления до допустимо малого значения невозможно с помощью описанных выше методов, поэтому для этой цели могут оказаться полезными вертикальные заземляющие стержни и химическая обработка грунта.

Расчетные сопротивления заземления могут быть получены с помощью эмпирических формул приведенных в различных стандартах, тем не менее, рекомендуется проведение измерений по завершении строительства так, чтобы, в случае необходимости, можно было провести дополнительные мероприятия.

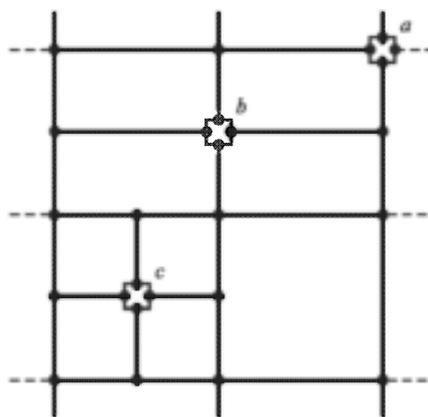
**Соединения корпуса КРУЭ с контуром заземления.** Частые соединения корпуса КРУЭ с контуром заземления и то обстоятельство, что фазные оболочки также соединены друг с другом, снизит напряжения шага и прикосновения в пределах площади, занятой КРУЭ. Соединения должны быть короткими и прямыми, насколько возможно для снижения их сопротивления при высоких частотах.

На рис. 10.28 показано, что оборудование может быть подключено в точке пересечения сетки (*a*) или с помощью дополнительных соединений (*b* и *c*).

Требование выполнять соединения с землей насколько возможно короткими и прямыми предполагает, что корпус КРУЭ находится как можно ближе в поверхности земли, хотя это соображение не должно быть определяющим при проектировании самого КРУЭ.

**Разрывы.** На разрывах в корпусе КРУЭ могут возникать высокочастотные напряжения и поэтому необходимо принять меры по их снижению.

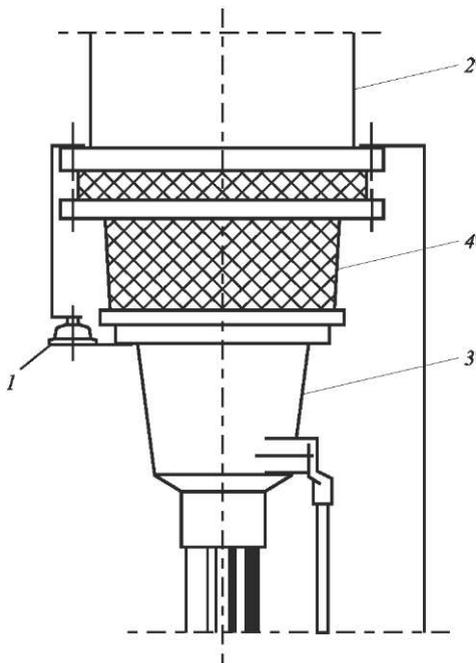
**Кабельные вводы.** Применение изоляционных фланцев для кабельных вводов приводит к разрыву оболочки корпуса, но доступно простое и экономичное решение проблемы путем



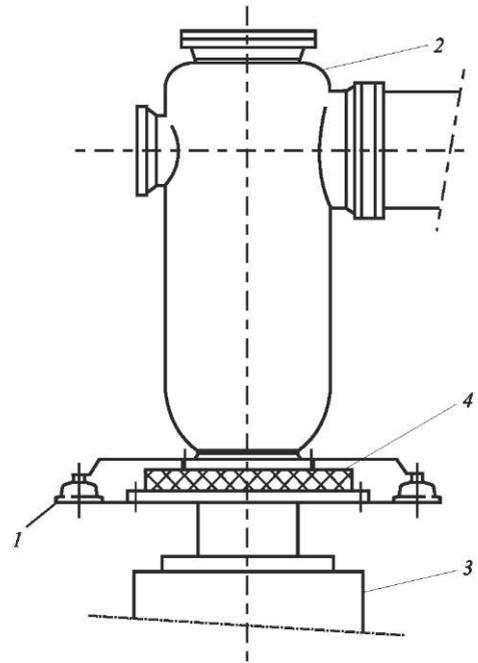
**Рис. 10.28. Соединения оборудования с контуром заземления**

установки нелинейных резисторов (варисторов), симметрично подключенных короткими соединительными проводами вокруг фланца (рис. 10.29). Вместо нелинейных резисторов можно использовать помехоподавляющие конденсаторы.

**Трансформаторные или реакторные вводы.** Там, где оборудование КРУЭ подключается к трансформатору, реактору и т.д. с помощью вводов, требование разделить металлические оболочки двух элементов приводит к необходимости изоляции двух фланцев и, соответственно, к разрыву в корпусе. Высокочастотная разность потенциалов на разрыве может быть снижена до допустимого уровня путем установки нелинейных сопротивлений (рис. 10.30). В ряде случаев металлические оболочки принудительно соединяют друг с другом, но даже, несмотря на это возможно проявление импульсного сопротивления соединений.



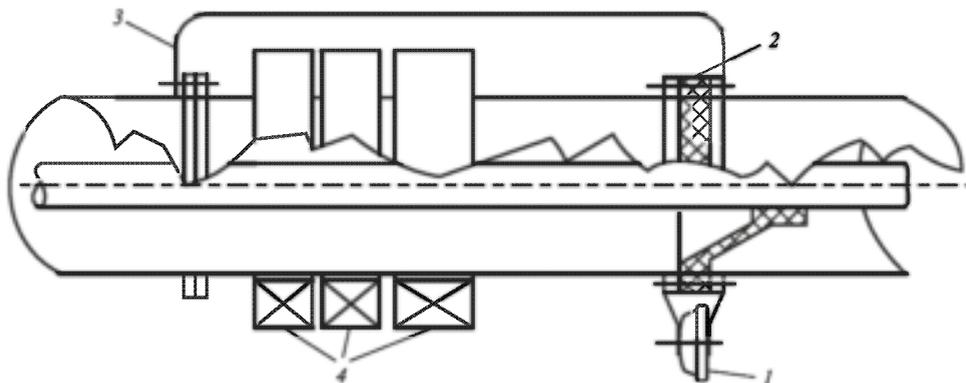
**Рис. 10.29. Включение варистора между металлическим корпусом КРУЭ и металлическими частями кабеля:**  
 1 – варистор; 2 – металлический корпус КРУЭ; 3 – металлическая часть концевой муфты; 4 – изолятор



**Рис. 10.30. Включение варистора между металлическим корпусом КРУЭ и баком трансформатора:**  
 1 – нелинейное сопротивление; 2 – металлический корпус КРУЭ; 3 – бак трансформатора; 4 – изолятор

**Трансформаторы тока, установленные на внешней стороне корпуса.** Если трансформаторы тока установлены на внешней стороне корпуса, то, со всей очевидностью, необходимо устранить протекание токов промышленной частоты по корпусу в направлении, противоположном току замыкания в основном проводнике. Соответственно в этих местах необходима установка изолирующих фланцев. Это приводит к появлению еще одного вида разрыва бака с соответствующей опасностью появления большой разности потенциалов высокой частоты. Устранить проблему можно путем установки специально спроектированных шунтов вокруг ТТ или, что более

предпочтительно, варисторов, включенных симметрично вокруг фланца (рис. 10.31). В ряде случаев можно использовать искровые промежутки. Также могут оказаться эффективными помехоподавляющие конденсаторы.



**Рис. 10.31. Шунтирование разрыва металлического корпуса варистором:**

1 – варистор; 2 – изолятор; 3 – шунт; 4 – трансформатор тока

**Элегазовые вводы.** Несмотря на то, что для элегазовых вводов не применяют изолированные фланцы, тем не менее, за счет различия импульсных сопротивлений внутренних шинпроводов и вводов, существует разрыв корпуса, и важно свести к минимуму высокочастотное сопротивление заземляющих проводников у вводов. Должны быть приняты все меры для того, чтобы устанавливать вводы как можно ближе к земле так, чтобы длина заземляющих проводников была как можно более короткой.

**Места входа в помещение.** Место, в котором КРУЭ входит в здание, предоставляет великолепную возможность улучшения соединений с землей, особенно если КРУЭ заканчивается элегазовым вводом вне здания. В этих условиях появится необходимость обеспечить путь низкого сопротивления для проходящей волны.

Компоновка, показанная на рис. 10.32, обеспечивает идеальный метод предотвращения входа в здание импульсов. Для наибольшей эффективности корпус КРУЭ должен быть хорошо соединен с металлическими частями окружающих стен, которые, в свою очередь, должны быть соединены с контуром заземления в, по крайней мере, в двух, а желательно в большем количестве точек. В качестве альтернативного варианта можно выполнить стены целиком из металла, при этом, конечно, обеспечив их хорошее соединение с корпусом КРУЭ.

**Варисторы.** Варисторы, спроектированные специально для защиты разрывов корпуса КРУЭ, как правило, недоступны. Следовательно, проектировщик систем заземления должен либо адаптировать варисторы, предназначенные для других целей, либо разрабатывать варисторы собственного производства, оптимизированные для достижения указанной цели. Во внимание следует принять такие факторы, как реакция на ступенчатое воздействие, номинальное напряжение и поглощаемая энергия. Особое внимание должно быть уделено снижению индуктивностей путем тщательного проектирования заземлителей.

**Помехи в цепях управления.** Проектировщику заземляющих систем должно быть очевидно, что при значительном расстоянии между концами кабелей управления и при сравнительно большом высокочастотном сопротивлении соединений с землей, если

не принять специальные меры, возможно появление большой разности потенциалов между концами управляющего кабеля (сотни киловольт).

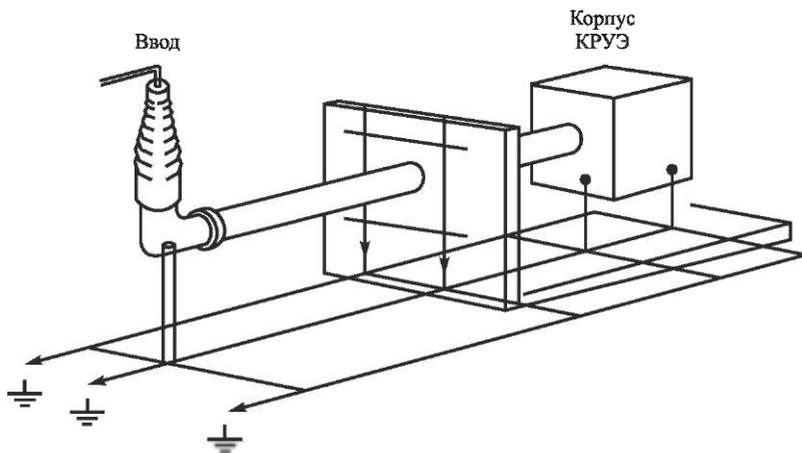


Рис. 10.32. Экранирование элегазового ввода на входе в здание

Ситуация может быть облегчена следующими способами.

**Тщательный выбор путей прокладки управляющих кабелей.** Связь между корпусом и управляющими кабелями может быть уменьшена, если последние располагать как можно дальше от корпуса и после точек входа (например, точек подключения ТТ) как можно быстрее уводить их от корпуса; экранирование кабелей управления.

Условия на КРУЭ, в особенности частотный диапазон, приводят к необходимости применять сплошные экраны; плетенные экраны ограничены в применении за счет их большого сопротивления на высоких частотах. Эффективного экранирования, тем не менее, можно добиться путем заключения отдельных кабелей в собственные экраны или заключения группы кабелей в металлические кабельные каналы или в полностью замкнутые кабельные лотки. Эти экраны должны быть соединены с оборудованием, например, реле давления газа и заземлены на противоположном конце кабеля прямыми короткими соединениями.

**Чувствительное оборудование управления.** Если некоторые устройства управления, защиты или телекоммуникации, связанные с КРУЭ, имеют очень высокий уровень чувствительности, или, если релейный шкаф расположен внутри КРУЭ, может оказаться необходимым осуществить полное экранирование шкафов, содержащих оборудование. При применении клетки Фарадея кабели от шкафа управления КРУЭ должны быть полностью экранированы и экраны соединены с экраном клетки по возможности напрямую. Для кабелей длиннее 60 м может оказаться необходимым применение разделительных трансформаторов или реле.

При усиливающейся тенденции устанавливать оборудование управления вблизи коммутирующих устройств возможность опасного их взаимного влияния возрастает.

**Измерительные трансформаторы.** Переходные напряжения, передаваемые измерительными трансформаторами во вторичные цепи, могут быть снижены путем тщательного расположения заземляющих проводов в трансформаторе и внутреннего экранирования вторичных обмоток.

### 10.7.3. Оценка влияния переходного потенциала корпуса

Явление повышения переходного потенциала корпуса вследствие протекания высокочастотных токов по корпусу, также известного как переходное повышение потенциала земли, состоит из кратковременного высоковольтного переходного процесса на внешней поверхности корпуса КРУЭ, связанного с пробоем элегаза, внутренними повторными зажиганиями между контактами работающих выключателей и разъединителей или внешними пробоями изоляции.

В любом случае скачок потенциала приводит к появлению импульсов, распространяющихся во всех возможных направлениях от точки пробоя. Эти импульсы, характеризующиеся очень короткой длительностью фронта, вызывают так называемые очень быстрые перенапряжения.

**Пробой внутри КРУЭ.** Внутри КРУЭ существуют две причины возникновения повышения напряжения корпуса:

- пробой элегаза между фазным проводом и корпусом (замыкание на землю);
- повторные зажигания между контактами работающих разъединителей и выключателей.

В обоих случаях импульсы распространяются внутри коаксиальных шин подстанции как следствие поверхностного эффекта до точки разрыва. Точку разрыва (рис. 10.33, 10.34) можно смоделировать двумя линиями передачи с разными волновыми сопротивлениями. В этой точке импульс попадает на внешнюю поверхность корпуса КРУЭ, вызывая тем самым переходное повышение напряжения.

Наиболее типично возникновение разрывов на воздушных и на кабельных вводах КРУЭ.

Остальные представляющие интерес разрывы возникают у трансформаторов тока, установленных снаружи корпуса, и, в ряде случаев, также у фланцев всех опорных изоляторов.

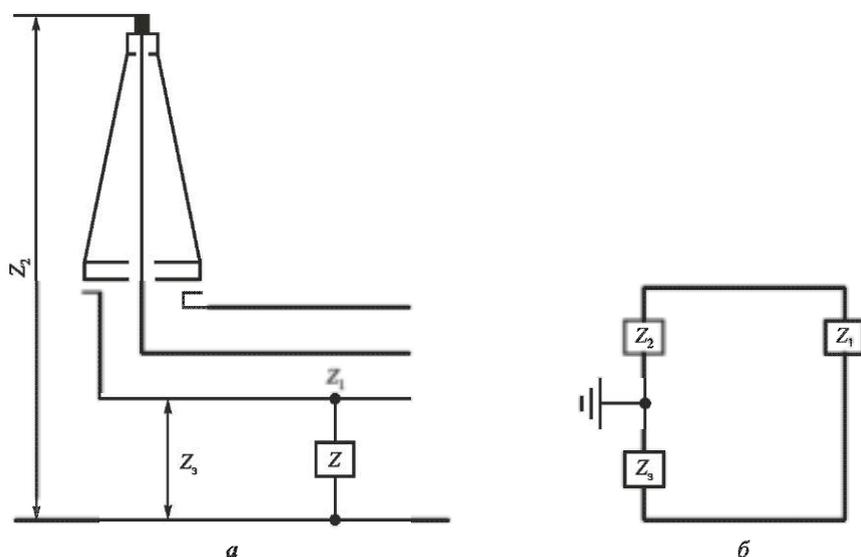


Рис. 10.33. Воздушный ввод в КРУЭ (а) и его схема замещения (б)

При замыкании на землю сначала появляется скачкообразное изменение напряжения, на разрыве амплитуда которого равна пробивному напряжению разрыва. Можно принять, что максимальная амплитуда импульса напряжения составляет

$$U_{100\%} = 1,2 \cdot 1,12 U_{\text{и.п}}$$

где коэффициент 1,2 составляет отношение между пробивными напряжениями при положительной и отрицательной полярностях  $U_{\text{и.п}}$  – импульсная прочность.

Коэффициент 1,12 осуществляет переход от  $U_{\text{и.п}}$  (10 %-я вероятность пробоя) к 100 %-й вероятности (полагая, что закон распределения  $U_{\text{и.п}}$  нормальный, среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 6\%$ ). Из-за возможности существования внутренних дефектов можно получить внутренние пробои при уровнях напряжения меньших  $U_{\text{и.п. КРУЭ}}$ ; в этом случае возникающие отражения импульсов от разомкнутых концов с соответствующей тенденцией к удвоению могут приводить к вторичным пробоям на более высоких уровнях напряжения, вплоть до  $U_{100\%}$ . В частности это может происходить во время испытаний изоляции даже в случае, если координация изоляции была осуществлена верно.

Скачок напряжения при внутреннем пробое характеризуется временем нарастания  $t$  в диапазоне нескольких наносекунд, нижний предел которого можно оценить как

$$T_{r\text{min}} = \frac{1 + 1,5}{p},$$

где  $p$  – давление газа.

При внутренних повторных зажиганиях наибольшая разность потенциалов между контактами составляет ~ трехкратное номинальное напряжение, при коммутации ненагруженного трансформатора (индуктивная нагрузка) и 1,5–2 кратное для разъединителей (редко 2,5). Из-за пробоя между контактами возникает два импульса напряжения, распространяющихся в противоположных направлениях в сторону точек разрыва, причем амплитуда каждого скачка составляет половину от начальной разности потенциалов.

Далее рассматриваются коэффициенты преломления, относящиеся к распространению первого скачка напряжения при внутреннем пробое, для каждого из двух главных видов разрыва в КРУЭ, т.е. для воздушных вводов и для кабельных вводов в КРУЭ.

**Воздушный ввод.** Воздушный ввод можно представить на схеме рис. 10.33 как соединение трех длинных линий. Преломление падающей внутренней волны на воздушную линию и на корпус приводит к повышению напряжения относительно земли, амплитуда которого может быть получена умножением амплитуды начального скачка, появившегося внутри КРУЭ на коаксиальном шинопроводе, на коэффициент:

$$S_1 = \frac{-2Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3},$$

где  $Z_1$  – волновое сопротивление коаксиального шинопровода;  $Z_2$  – волновое сопротивление линии;  $Z_3$  – волновое сопротивление корпуса (относительно земли).

Когда волна распространяется на внешнюю сторону корпуса, в процесс вовлекаются соединительные провода с землей и соседними фазами, которые можно рассматривать как длинные линии.

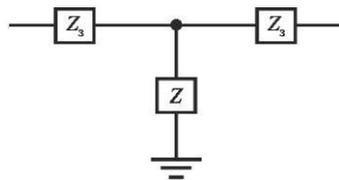


Рис. 10.34. Схема для оценки распространения импульса за пределы КРУЭ

Амплитуда скачка, распространяющегося в сторону соединителей, определяется умножением амплитуды начального скачка на передаточный коэффициент соединения (см. рис. 10.34)

$$S_2 = \frac{-2Z}{2Z + Z_3}$$

где  $Z$  – волновое сопротивление заземляющих проводников.

Часть волны, распространяющаяся вдоль заземляющих проводников, отражается в точке соединения с землей и возвращается к корпусу с обратным знаком, где снижает напряжение исходной волны (рис. 10.35). Если длина заземляющего проводника такова, что удвоенное время пробега меньше времени фронта исходного скачка напряжения, то изменение напряжения происходит до достижения максимального значения, т.е., на фронте скачка.

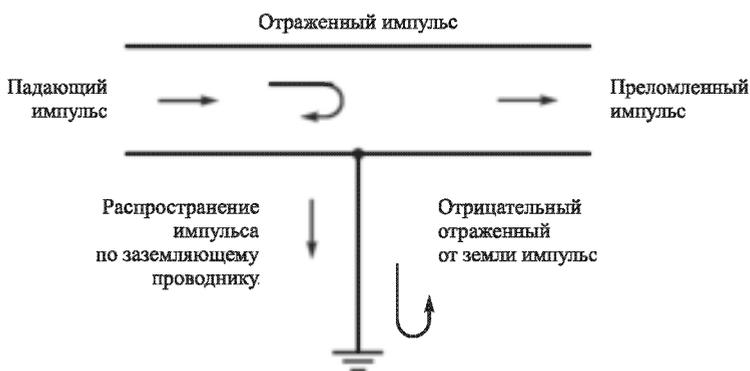


Рис. 10.35. Распространение импульса по заземляющему проводнику

**Кабельный ввод.** Экраны кабелей и корпус КРУЭ обычно разделены изоляционной муфтой и соединяются с землей отдельно.

Соединение кабеля и КРУЭ может быть представлено схемой рис. 10.36. Передаточный коэффициент, связывающий амплитуду волны между корпусом и землей, определяется следующим образом:

$$S = \frac{-2Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_c}$$

где  $Z_c$  – волновое сопротивление экрана кабеля.

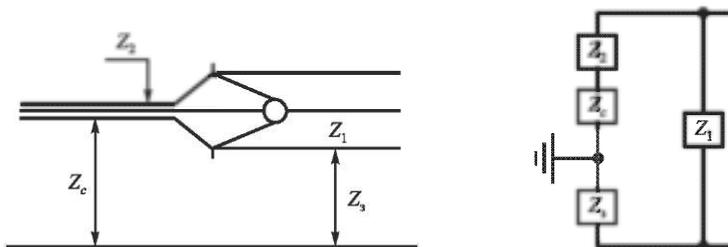
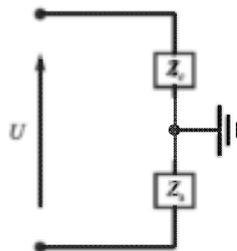


Рис. 10.36. Схема для расчета перенапряжений на корпусе, обусловленных вводом кабеля в КРУЭ

Рис. 10.37. Схема включения ограничителя в точке воздушного ввода в КРУЭ



Обычно между экраном кабеля или корпусом КРУЭ установлены варисторы, конденсаторы или искровые промежутки, предназначенные для снижения быстрых перенапряжений на корпусе за счет обеспечения электрической целостности. Падение напряжения на конденсаторе, варисторе или искровом промежутке в сумме с падением напряжения на соединительных проводниках определяют напряжение, приложенное к последовательной цепи, образуемой  $Z_2$  и  $Z_1$  (рис. 10.37).

**Количественные оценки.** С учетом сказанного выше можно констатировать, что наиболее тяжелые условия возникают на воздушных вводах КРУЭ. Для одной фазы корпуса КРУЭ интересующие нас волновые сопротивления можно рассчитать следующим образом:

- для коаксиальной системы  $Z = 60 \ln(R/r)$ ;
- для системы цилиндр–плоскость

$$Z = 60 \ln \left( \frac{h + \sqrt{h^2 - R^2}}{R} \right)$$

где  $r$  – радиус внутреннего проводника;  $R$  – радиус корпуса;  $h$  – расстояние (высота) между центром проводника и плоскостью земли.

Следует иметь в виду, что формула для системы цилиндр–плоскость – приближенная.

Волновое сопротивление вертикального заземляющего проводника может быть приближенно получено как для горизонтального проводника, находящегося на средней высоте вертикального. Волновые сопротивления других элементов перехода меняются в широком диапазоне. Ориентировочные значения следующие:

$$Z_1 = 60/90 \text{ Ом}; \quad Z_2 = 350/450 \text{ Ом};$$

$$Z_3 = 200/260 \text{ Ом}; \quad Z = 150/300 \text{ Ом}.$$

При указанных сопротивлениях коэффициенты  $S_1$  и  $S_2$ , определенные для воздушного ввода, принимают значения:

$$S_1 = 0,54/0,78 \quad \text{и} \quad S_2 = 0,54/0,75.$$

Учитывая, что на некотором расстоянии корпуса каждой из трех фаз очень близки и, следовательно, соединены параллельно, полное волновое сопротивление корпуса может рассматриваться как параллельное соединение трех волновых сопротивлений трех корпусов. В этом случае  $S_1$  снижается до

$$S_1 = 0,10/0,18.$$

Более того, наличие нескольких заземляющих проводников может привести к снижению сопротивления  $Z$ , уменьшая тем самым  $S_2$ .

#### 10.7.4. Пробой снаружи КРУЭ

Основной причиной быстрых переходных процессов, приходящих извне, являются пробои линейной изоляции, вызванные, например, обратными перекрытиями. Как следствие этого, максимальное значение напряжения импульса, набегающего на КРУЭ, может быть определено из уровня электрической прочности линии. Это значение определяется для положительной полярности и 10 %-й вероятности пробоя. Следовательно, максимальное значение получается умножением уровня прочности на коэффициент 1,15, учитывающий возможность пробоя при отрицательной полярности, и на коэффициент 1,12 для достижения 100 %-й вероятности пробоя (как это было выше сделано для внутренних коротких замыканий):

$$U_{100\%} = 1,15 \cdot 1,12 U_{пр.л.}$$

Получающийся скачок напряжения характеризуется крутизной порядка 2000 кВ/мс. Коэффициенты преломления такие же, как и для внутренних пробоев.

#### 10.7.5. Критичность начального броска напряжения

Очевидно, что амплитуда и форма быстрых переходных напряжений являются функциями начального скачка напряжения, а также конфигурации подстанции.

Из рассмотренных выше значений амплитуд и длительностей фронта начальных скачков напряжения следует, что источником наибольших переходных повышенных напряжений являются пробои внутри КРУЭ. Повторные зажигания между контактами дают много меньшие напряжения, но, с другой стороны, они возникают в ходе нормальной работы подстанции. Более того, за время отключения секции шин разъединителем возможно возникновение десятков и сотен повторных зажиганий между контактами.

#### 10.7.6. Испытания и обслуживание заземляющих установок КРУЭ

**Промышленная частота.** Основной причиной для проведения измерений заземляющей установки является проверка адекватности новой установки проекту и выявление дополнительных мер, необходимых для защиты персонала и управляющих/или коммутационных устройств. Измерения также рекомендуется проводить после серьезных изменений, влияющих на базовые требования, и через регулярные промежутки времени (от пяти до десяти лет) для проверки работоспособности заземляющей конструкции.

Измерения обычно дают более надежные результаты, чем расчеты и, в любом случае, всегда полезны для проверки последних.

Удобный метод, базирующийся на инъекции тока с помощью вспомогательного электрода, применен в ряде коммерчески доступных измерительных устройствах и позволяет напрямую получить значение сопротивления заземления.

Для больших установок, где расстояние до вспомогательного электрода велико, эффекты индукции в длинных измерительных кабелях могут приводить к ощутимым ошибкам. Они могут быть снижены путем увеличения инжектируемого тока.

Инспектирование и испытания контура заземления и соединительных проводников должны проводиться до ввода установки в эксплуатацию. Необходимо убедиться

в надежности всех соединений. При измерении контактного сопротивления проводников одинакового размера измерительные клеммы должны располагаться на расстоянии примерно 25 мм с каждой стороны соединителя. Контактное сопротивление не должно превосходить сопротивления аналогичного проводника эквивалентной длины. Если соединяются проводники различного сечения, сопротивление не должно превышать 75 % от проводника наименьшего сечения эквивалентной длины.

Указанные выше проверки и испытания должны повторяться через интервалы обслуживания, когда устраняются последствия погодных, разрушающих или коррозионных воздействий.

**Высокая частота.** Испытания и проверки должны быть направлены на обеспечение целостности заземляющей конструкции при токах промышленной частоты, но для высокочастотных цепей возможно принятие дополнительных мер.

Так как высокочастотные явления возникают в основном из-за коммутаций разъединителями, способность заземляющей конструкции работать при высокочастотных переходных воздействиях вероятно может быть оценена при плановой коммутации разъединителем на этапе сдачи подстанции в эксплуатацию.

Во время таких коммутаций нужно выполнить проверки на предмет образования искр у фланцев и ошибок в работе защитных и управляющих систем.

Предполагается, что все оборудование вторичных цепей проходит проверку на ЭМС в заводских условиях и что цель всех испытаний на месте останова сводится к проверке корректности транспортировки и монтажа оборудования. Испытания показывают также, не воздействует ли каким-либо образом КРУЭ на оборудование вторичных цепей.

Вопросы компоновки КРУЭ привносят в процесс проектирования заземляющих систем ряд факторов, не присущих традиционным открытым подстанциям. Тем не менее, выполняя представленные выше указания можно проектировать заземляющие системы, нечувствительные к повышению переходного напряжения.

Таким образом, очевидно, что между производителем КРУЭ и потребителем должна быть тесная кооперация, направленная на согласование решений различных аспектов задачи проектирования систем заземления на ранних этапах. Также на этапе проектирования требуется обеспечить тесное взаимодействие между различными производителями, вовлеченными в строительство подстанции. Устранение недоработок после ввода оборудования в эксплуатацию может оказаться дорогостоящим и неудобным мероприятием.

## **10.8. Ограничения коммутационных электромагнитных помех в цепях управления с индуктивными элементами**

В индуктивных цепях электрического оборудования, включающих, например, обмотки возбуждения двигателей или устройства с электромагнитным приводом, такие, как реле, а также соединительные силовые и управляющие провода, возникают при отключениях и включениях перенапряжения, которые с высокими крутизной и частотой колебания попадают в сеть питания.

Индуктивные элементы в цепи тока принадлежат, таким образом, к источникам интенсивных помех. Если они эксплуатируются в тесном пространственном расположении с электронными узлами, например, внутри одного прибора, одного управляющего

шкафа или установки необходимо снизить до уровня, допустимого для электронных приборов и систем, ожидаемые перенапряжения путем соответствующих мер.

Ниже будут рассмотрены физические причины, порядки величин, и принципиальные временные диаграммы этих переходных перенапряжений и также описаны выбор, измерение и расположение соответствующих средств для их ограничения.

### 10.8.1. Физические процессы при коммутациях в индуктивных цепях

На рис. 10.38 показана в упрощенном виде модель взаимодействия между цепью тока возбуждения электромагнитного устройства и цепью тока систем РЗА и автоматизированного и автоматического управления технологическим процессом. Обе цепи гальванически разделены из соображений помехозащищенности, однако связаны через практически всегда имеющиеся паразитные емкости  $C_{13}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ . Кроме того, через сцепление магнитных потоков обоих контуров возникает индуктивная связь, характеризуемая взаимной индукцией  $M$ . Вследствие возникающего при разрядных явлениях между контактами выключателя СВЧ-излучения, кроме того, возможно неблагоприятное влияние дальнего поля на логические цепи систем РЗА и автоматизированного и автоматического управления технологическим процессами.

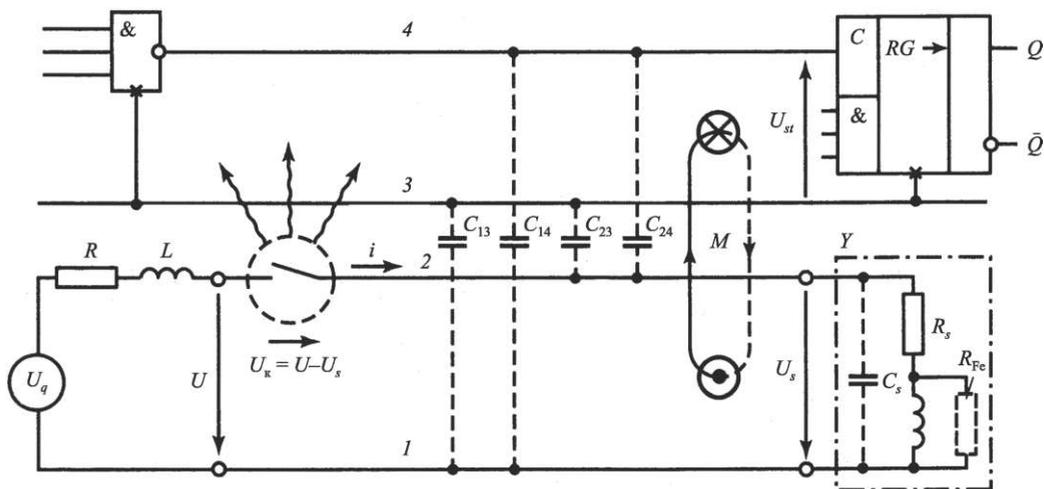


Рис. 10.38. Модель взаимодействия цепи, содержащей индуктивный элемент, с логической цепью системы автоматизированного и автоматического управления технологическим устройством

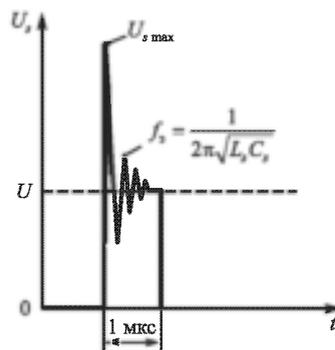
При включении прибора  $Y$  емкость  $C_s$  заряжается через сопротивление  $R$  (внутреннее сопротивление источника напряжения и сопротивление линии), индуктивность  $L$ . При идеально быстро включающемся выключателе в контуре  $LC_s$  развивается электрический колебательный затухающий процесс, который в основном определяется параметрами  $L$  и  $C_s$ . Он протекает с частотой  $f_3 = 1/2\pi\sqrt{L_s C_s}$  (рис. 10.39) и максимальным напряжением  $U_{s\max}$  на катушке индуктивности.

Напряжение  $U_{s\max}$  может лежать между 300 В и несколькими киловольтами, скорости изменения напряжения – от 1 до 1000 В/с, общая длительность процесса лежит в микросекундной области, а частота – в границах от  $10^6$  до  $10^8$  Гц.

**Рис. 10.39.** Типичная форма импульса  $U_s$  напряжения на катушке при включении

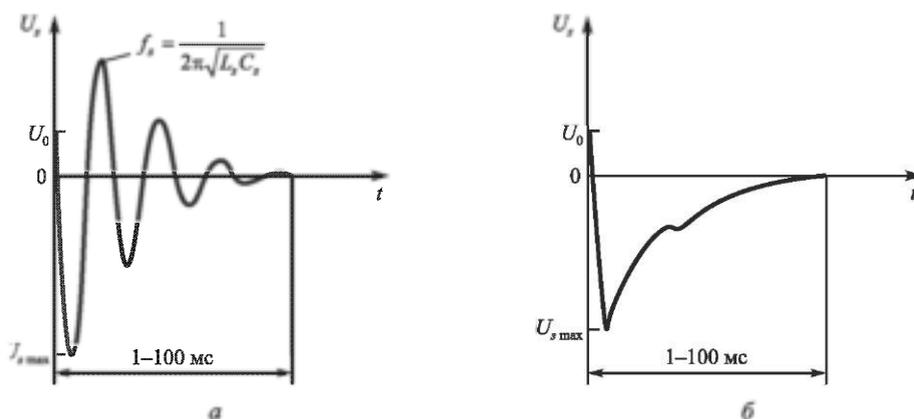
Образование помех затрудняется тем, что для срабатывания реального выключателя требуется конечное время.

Оно образуется, например для тиристора, из времени, которое необходимо, чтобы заполнить достаточно большие зоны полупроводникового материала носителями заряда, а для выключателей с подвижными контактами, включающими напряжения  $\geq 300$  В, из времени, за которое образуется проводимость искрового разряда. Типичные времена срабатывания мощных тиристоров (0,2–4 кВ) от 5 до 200 мкс, реле и герконов  $\sim 3$  нс.



При контактных устройствах включения как правило нужно рассчитывать на то, что процесс включения вследствие явлений вибрации и других физических процессов состоит из ряда следующих друг за другом циклов замыкания и размыкания. Поэтому всегда нужно рассчитывать на то, что в течение включения возникают несколько изображенных на рис. 10.39 затухающих процессов, типичных для процессов отключения (см. далее). Таким образом, в целом каждый процесс включения электромагнитного устройства необходимо оценивать как потенциальную причину помехи.

При отключении электромагнитного устройства, т.е. при внезапном прерывании стационарного тока возбуждения  $i$  в колебательном контуре, образованном  $R_s$ ,  $L_s$  и  $C_s$ , также происходит электрический колебательный затухающий процесс, при котором запасенная к моменту отключения в  $L_s$  и  $C_s$  энергия в  $R_s$  превращается в тепло. Если опять предположить наличие в цепи тока быстрого, почти идеального выключателя, то этот затухающий процесс протекает либо колебательно с частотой  $f_c \approx 1/2\pi \sqrt{L_s C_s}$  (рис. 10.40а) или аperiodически затухая (рис. 10.40б). Вид импульса напряжения на катушке  $U_s$  по рис. 10.38 типичен для устройств с магнитопроводом, набранным из отдельных пластин, а вид по рис. 10.40б – для устройств с массивным магнитопроводом. Сильно затухающий процесс на рис. 10.40б можно объяснить влиянием  $R_{Fe}$ , которое представляет сопротивление потерь в стали массивного магнитопровода.



**Рис. 10.40.** Типичные импульсы напряжения на катушке  $U_s$  при отключении тока идеальным выключателем:

а – набранный магнитопровод, б – массивный магнитопровод

Без специальных мер затухающие процессы в обоих случаях сопровождаются высокими перенапряжениями  $U_{s \max}$  и большими скоростями изменения напряжения  $dU_s/dt$ . Максимальное, теоретически возможное, перенапряжение на катушке может быть оценено, исходя из баланса энергии

$$C_s \frac{U_{s \max}^2}{2} \approx L_s \frac{i^2}{2}, \quad (10.1)$$

а максимально возможное значение производной по времени  $(dU_s/dt)_{\max}$ , – исходя из описывающего затухающий процесс дифференциального уравнения. Если положить в основу практически всегда выполняющееся условие  $C_s R_s \ll L_s/R_s$  и пренебречь влиянием  $R_s$ , можно получить в итоге для обоих величин, простые соотношения:

Параметр .....	$U_{s \max}$	$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\max}$	$-f_s$
Формула .....	$i \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$	$-\frac{i}{C_s}$	$-\frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$

Теоретическое значение  $U_{s \max}$ , однако, не достигается, поскольку:

- часть запасенной к моменту отключения в  $L_s$  энергии

$$W_s = L_s \frac{i^2}{2}$$

при перезарядке превращается в тепло в сопротивлении обмотки  $R_s$ ;

- вихревые токи и потери на гистерезис также поглощают часть энергии  $W_s$  особенно при массивном магнитопроводе;
- при отключении контактным отключающим устройством между контактами начинается разрядный процесс, который также поглощает часть энергии  $W_s$ .

Параметры  $U_{s \max}$ ,  $(dU_s/dt)_{\max}$  имеют следующие воздействия:

- изоляция обмоток электромагнитного устройства подвергается перенапряжением, так как  $U_{s \max} \gg U$ ;
- в выключателях в зависимости от возможной величины тока возникают тлеющие, искровые или дуговые разряды между контактами вследствие того, что  $|U_{s \max}| \gg U$ . Из-за этого, в частности, контактный промежуток в течение времени отключения многократно размыкается и из-за начавшегося под воздействием  $U_{s \max}$  снова замыкается. Это ведет к известным щеточным явлениям на графике напряжения катушки (рис. 10.41). Частота, сопровождающая щеточные явления, лежит в области  $10^4$ – $10^7$  Гц. Таким образом, явления разряда, с одной стороны, являются источником интенсивных ВЧ-помех, а с другой – особенно в цепях постоянного тока с большими индуктивностями, причиной для сильного износа контактов;
- в расположенных рядом цепях РЗА возникают кратковременные помехи, либо нарушается работа логических элементов, если наведенное через  $C_{13}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$  и  $M$  напряжение помехи  $U_s$  (см. рис. 10.40б) либо энергия помехи через излучение превышает порог помехоустойчивости.

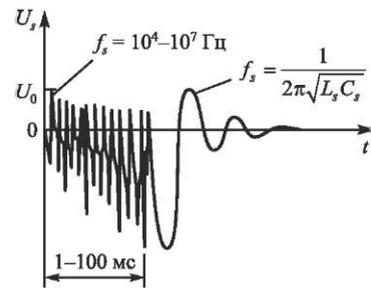


Рис. 10.41. Процесс отключения с щеточным явлением

В цепях электромагнитных устройств, содержащих индуктивный элемент, всегда требуются меры для подавления ожидаемых перенапряжений при отключениях. Это удастся осуществить схемными комбинациями из пассивных или активных элементов. Их структурирование, величина и расположение зависят от того, с какой целью должны быть реализованы схемные мероприятия. В табл. 10.7 дан обзор по этому вопросу. В дальнейшем будут рассматриваться исключительно схемы защиты от помех.

Таблица 10.7

**Схемные мероприятия в цепях электромагнитных приборов,  
содержащих индуктивные элементы**

Схемные мероприятия	Цели	Расположение элементов защиты
Схемы защиты обмоток возбуждателей	Защита изоляции от перенапряжений	Параллельно катушке индуктивности
Схемы защиты от радиопомех и защиты контактов	Подавление тлеющих, дуговых, искровых разрядов между контактными элементами во избежание ВЧ колебаний и для уменьшения обгорания контактов	Устройства защиты от радиопомех параллельно контактам, чтобы исключить влияние индуктивности проводов. Устройства защиты контактов (преимущественно RC-звенья) параллельно катушке индуктивности
Схемы защиты полупроводниковых участков включения	Защита полупроводниковых элементов от перенапряжений	Параллельно участку включения тиристоров. Параллельно нагрузке, если между катушкой и транзистором нет длинных соединительных проводов
Схемы защиты от помех	Возможное снижение $U_{s\max}$ и $(dU_s/dt)_{\max}$ , чтобы избежать функциональных помех в соседних электронных системах, или предотвратить разрушение логических элементов	По возможности непосредственно на катушке индуктивности

**10.8.2. Критерии оценки схем защиты от помех**

Для устройств на постоянном и переменном токе существует большое число возможных вариантов схем защиты (см. табл. 10.8 и 10.10, рис. 10.46 и 10.47). Вопрос о возможности их применения в конкретных случаях решают с учетом следующих факторов (перечисление без учета важности):

- время срабатывания;
- нагрузочная способность по импульсному току и способность к поглощению энергии;
- эффективность ограничения  $U_{s\max}$  и  $(dU_s/dt)_{\max}$ ;
- вид напряжения на катушке  $U_s$  и тока возбуждения  $i$  после отключения (колебательный или апериодический);
- нагрузка выключателя по току при включении;

- стационарный ток потерь;
- влияние времени задержки защищаемого прибора;
- влияние надежности системы в целом;
- характеристика старения (дрейф параметров);
- характеристика поведения при аварии (КЗ или обрыв с вытекающими отсюда последствиями);
- степень сложности правильного определения параметров.

Подходящей должна считаться схема защиты, которая:

- имеет приемлемые экономические показатели;
- при экономном исполнении позволяет производить достаточное подавление перенапряжений по возможности непосредственно на катушке индуктивности;
- характеризуется очень малым временем срабатывания;
- по возможности не вызывает стационарных потерь энергии;
- не ухудшает общей надежности системы;
- по минимуму изменяет время срабатывания устройства;
- может рассчитываться по простым правилам.

### 10.8.3. Схемы защиты от помех для устройств постоянного тока

В табл. 10.8 дан обзор важнейших свойств схем защиты, которые могут применяться в приборах постоянного тока.

В табл. 10.8. приняты следующие обозначения:  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $C_s$ ,  $T_s = L_s/R_s$  – действующее сопротивление, индуктивность, емкость и постоянная времени обмотки возбуждения;  $I_{ном}$ ,  $U_{ном}$  – номинальные ток и напряжение обмотки;  $I_{доп}$  – допустимый ток включения выключателя;  $I$  – ток пропускания диода;  $I_{л}$  – ток потерь;  $I_{Zmax}$  – максимально допустимый ток;  $MOV$  – металлоксидный варистор;  $P_{лmax}$  – максимально допустимая мощность потерь;  $R_p$  – разрядное сопротивление;  $t_{зап}$  – время восстановления запириания диода;  $U_{с ном}$  – номинальное напряжение конденсатора;  $U_{нб,раб}$  – верхнее рабочее сглаженное напряжение варистора (см. рис. 10.5);  $U_R$  – напряжение запириания диода;  $U_Z$  – Z-напряжение (рис. 10.45а);  $z$  – число отключений за единицу времени;  $a$  – постоянная варистора.

Далее остановимся на характеристиках некоторых защитных элементов.

**Диоды.** Самое радикальное подавление перенапряжений при отключении осуществляется чисто диодной схемой (табл. 10.10, столбец 2). Поскольку скорость включения диода существенно выше, чем у коммутационного устройства, на катушке при отключении не возникает перенапряжений.

Напряжение запириания диода выбирается  $U_R > 1,5U_{ном}$  и ток  $I_F > 1,5I_{ном}$ . Время восстановления запириания  $t_{зап}$  должно быть меньше 100 нс, чтобы вибрационные процессы на контактах выключателя не разрушили диод. При подключении нужно обращать внимание на правильную полярность. В приборах с якорем время срабатывания за счет схемы защиты не изменяется, тогда как время возврата по сравнению с прибором без такой схемы увеличивается в 10–20 раз. Это свойство может успешно использоваться, когда, например, нужно перекрыть перерывы напряжения в течение нескольких миллисекунд. В целом диодные схемы при малых размерах и пренебрежимом токе потерь имеют очень хорошее помехозащитное действие. Они используются, когда удлинение времени возврата прибора со схемой защиты не имеет негативных последствий для функционирования устройства в целом.

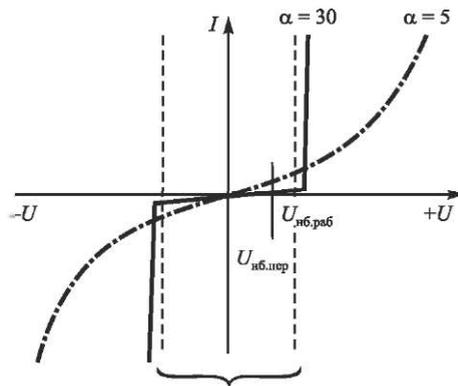
**Резисторы.** Параллельное с индуктивной обмоткой включение резистора сопротивлением  $R_p$  (табл. 10.8, столбец 3) является лишь условно возможной схемой защиты. Для снижения перенапряжения при отключении оно должно быть не слишком большим, с другой стороны, для ограничения длительности процесса отключения и сохранения тока потерь  $I_{\text{п}} = U_{\text{ном}}/R_p$  в приемлемых границах, не слишком малым. Оно выбирается в пределах  $R_p = (2-3)R_s$  и рассчитывается по току потерь. Параллельные сопротивления используются в схемах обмоток двигателей. Для схем защиты от помех их нельзя рекомендовать к применению.

Резисторы с диодами. Можно получить улучшенные свойства, если последовательно с  $R_p$  включить диод (табл. 10.8, столбец 4). При включенной катушке в этом случае без учета обратного тока диода, который пренебрежимо мал, через  $R_p$  не протекает никакого тока. Следовательно, источник напряжения дополнительно не нагружается, исключается дополнительное выделение тепла и  $R_p$  термически нагружается меньше. Выбор диода производится, как в столбце 2 табл. 10.10. Здесь также необходимо следить за правильной полярностью.

**Варисторы.** Варисторы (табл. 10.8, столбец 5) являются сопротивлениями, зависящими от напряжения с симметричной, сильно нелинейной вольт-амперной характеристикой (рис. 10.42). Она описывается уравнением

$$I = kU^\alpha, \quad (10.2)$$

где  $k$  – константа;  $\alpha$  – показатель степени, характеризующий нелинейность вольт-амперной характеристики. Значения  $\alpha$  лежат при обычных варисторах из карбида кремния в области от 3 до 5, а при металлоксидных варисторах на базе оксида цинка – в области от 20 до 30. Последние, вследствие того, что они имеют очень короткое время срабатывания (20–50 нс), очень хорошо подходят в качестве элементов ограничения перенапряжений. При отключении катушки они обеспечивают при сравнимых перенапряжениях  $U_{s \text{ max}}$  меньшее время  $t_0$ , чем описанные до этого варианты схем.



**Рис. 10.42.** Вольт-амперные характеристики варистора из карбида кремния ( $\alpha = 5$ ) и из оксида цинка (металлоксидный варистор,  $\alpha = 30$ )

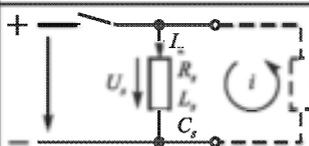
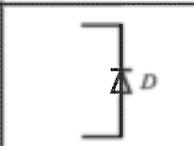
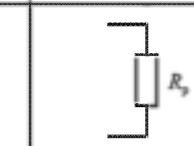
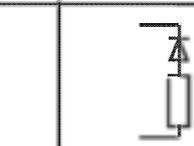
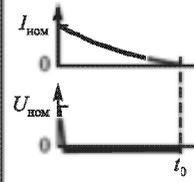
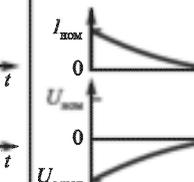
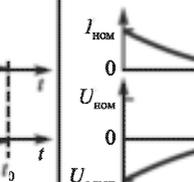
Выбор подходящего металлоксидного варистора осуществляется с учетом следующих обстоятельств.

Во-первых, с учетом наибольшего рабочего напряжения варистора  $U_{\text{нб, раб}}$  (см. рис. 10.42). Оно выбирается с учетом допуска  $\Delta U_{\text{ном}}$  положительного отклонения рабочего напряжения прибора  $U_{\text{ном}}$ :

$$U_{\text{нб, раб}} \geq U_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right) = (1,1-1,2)U_{\text{ном}}, \quad (10.3)$$

где  $U_{\text{нб, раб}}$  – наибольшее рабочее напряжение (наивысшее длительно допустимое постоянное напряжению, которое может быть приложено к варистору);  $U_{\text{ном}}$  – наибольшее

## Обзор свойств важнейших схем

Схема защиты и ее характеристики	Схема защиты с диодом	Схема защиты с резистором	Схема защиты с последовательным соединением диода и резистора
1	2	3	4
			
Форма импульсов			
Максимальное перенапряжение при отключении катушки	$U_{s \max} \approx 0$	$U_{s \max} = -U_{\text{НОМ}} \frac{R_p}{R_s}$	$U_{s \max} = -U_{\text{НОМ}} \frac{R_p}{R_s}$
Время, за которое $i$ достигает нуля	$t_0 \approx 3T_s$	$t_0 \approx \frac{3T_s}{1 - (U_{s \max} / U_{\text{НОМ}})}$	$t_0 \approx \frac{3T_s}{1 - (U_{s \max} / U_{\text{НОМ}})}$
Реализуемая область значений $U_{s \max} / U_{\text{НОМ}}$ $t / 3T_s$	0 1	-2...-3 0,33-0,25	-1...-3 0,5...0,25
Потребление тока схемой помехозащиты	$I \approx 0$	$I = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_p} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{-U_{s \max} / U_{\text{НОМ}}}$	$I_{\text{п}} \approx 0$
Параметры	$I_F > (1,5-2)I_{\text{НОМ}}$ $U_R > (1,5-2)U_{\text{НОМ}}$ $t_{\text{п}} < 100 \text{ нс}$	$R_p = (2-3)R_s$	Диоды: см. столбец 1 $R_p = (1-3)R_s$ $R_p$ должно кратковременно проводить $I_{\text{п}}$
Примечания	Приемлемая цена, малые размеры, очень хорошее помехоподавление, но весьма велико $t_0$	Высокий ток длительных потерь, в качестве схемы защиты от помех не годится	Нет тока длительных потерь, хорошая помехозащита, недорогая, часто используется

защиты приборов постоянного тока

Варистор	Последовательное включение диода $D$ и диода Зенера $Z$	$RC$ -цепочка	Схема с диодом $D$ , конденсатором $C_p$ и резистором $R_p$
5	6	7	8
$U_{S \max} = -kI_{\text{НОМ}}^{1/\alpha} = -U(I_{\text{НОМ}})$ по рис. 10.6	$U_{S \max} = -U_Z$	$U_{S \max} \approx -\frac{U_{\text{НОМ}}}{R_p} \sqrt{\frac{L_s}{R_s}}$	$U_{S \max} = -\frac{U_{\text{НОМ}}}{R_p} \sqrt{\frac{L_s}{R_s}}$
$t_0 = \frac{aT_s / (a-1)}{-U_{S \max} / U_{\text{НОМ}}}$	$t_0 = \frac{T_s}{-U_{S \max} / U_{\text{НОМ}}}$	$t_0 = \frac{(\pi/2)T_s}{-U_{S \max} / U_{\text{НОМ}}}$	$t_0 = \frac{(\pi/2)T_s}{-U_{S \max} / U_{\text{НОМ}}}$
-0,2...-2,5 0,17-0,14	-1,5...-2,5 0,22-0,13	-1...-2 0,25-0,15	-1...-2 0,25-0,15
$I_{\text{П}} = \frac{I_s}{(-U_{S \max} / U_{\text{НОМ}})^a}$ при $MOV$ пренебрежима	$I_{\text{П}} \approx 0$	$I_{\text{П}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_p} e^{-U_{\text{НОМ}}^2 C_p}$	$I_{\text{П}} \approx 0$
$U_{\text{нб.раб}} > (1,1-1,2)U_{\text{НОМ}}$ $P_{\text{П}} \max \geq \frac{I_s}{2} I_{\text{НОМ}}^2 z$	Диоды: см. столбец 1 Z-диоды: $U_Z = (1,1-1,2)U_{\text{НОМ}}$ $P_{\text{П}} \max \geq \frac{I_s}{2} I_{\text{НОМ}}^2 z$ $I_{Z \max} \geq I_{\text{НОМ}}$	$R_p = (0,2-1)R_s$ Однако $R_p > U_{\text{НОМ}} / I_{\text{доп}}$ $C_p \approx L_s / 4R_p^2$ $U_{C \text{НОМ}} = (2-3)U_{\text{НОМ}}$	Диоды: см. столбец 1 $C_p \approx L_s / (2-4)R_p^2$ $U_{C \text{НОМ}} = (2-3)U_{\text{НОМ}}$ $R_p < T_p / 3C_p$
Очень хорошая помехозащита, возможен монтаж непосредственно на катушке возбуждения	Очень хорошая помехозащита, однако сравнительно дорогая, годится только для малых приборов	Очень хорошая помехозащита, особенно эффективное ограничение $dU_s/dt$ ; НЧ-колебания, вследствие чего в выключающих устройствах возможно повторное срабатывание	Очень хорошая помехозащита, нет НЧ-колебаний, специально для коммутационных устройств

переменное рабочее напряжение (эффективное значение наибольшего синусоидального напряжения 50 или 60 Гц, которое может быть длительно приложено к варистору).

Во-вторых, необходимо учитывать максимально допустимую мощность потерь варистора  $P_{п\max}$ . Она определяется согласно соотношению

$$P_{п\max} \geq \frac{L}{2} I_{ном}^2 z, \quad (10.4)$$

где  $z$  – число отключений в единицу времени.

По  $U_{нб.раб}$  согласно (10.3) и  $P_{п\max}$  соответственно (10.4) первоначально устанавливается тип варистора. Возникающее при отключении перенапряжение можно простым способом получить из вольт-амперной характеристики (рис. 10.43).

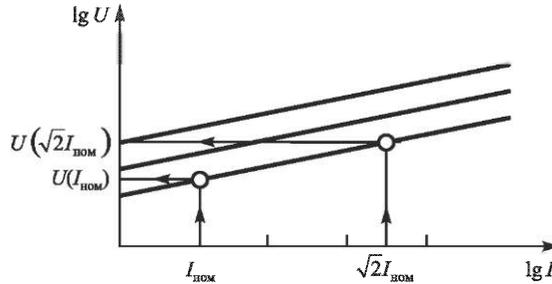


Рис. 10.43. Вольт-амперная характеристика варистора в логарифмическом масштабе

В-третьих, нужно убедиться, что максимально допустимый отводимый импульсный ток выбранного варистора не превышает, т.е. обеспечивается выполнение условия

$$\hat{i}_{и\max} = \hat{i}_{и\ном} \geq I_{ном}, \quad (10.5)$$

где  $\hat{i}_{и\ном}$  – максимально допустимая амплитуда стандартного импульса 8/20 мкс.

Номинальные отводимые металлоксидными варисторами токи (импульс 8/20 мкс) в зависимости от диаметра варистора и числа коммутаций приведены в табл. 10.9.

Таким образом, варистор диаметром 5 мм переносит в целом  $10^6$  стандартных импульсов амплитудой 10 А. Для случая, когда длительность импульса  $> 20$  мкс, допустимая амплитуда импульса уменьшается. Это предусматривается понижающим коэффициентом  $RF$ , который может быть получен в зависимости от длительности импульса  $\tau$ , рис. 10.44. Например, для  $\tau = 5$  мс при  $m = 10^6$  срабатываний получаем коэффициенты  $RF = 0,06$ . Для упомянутого 5-мм варистора выполняется соотношение

$$\hat{i}_{и\max} = 10 \cdot 0,06 = 0,6 \text{ А} \geq I_{ном}$$

Это означает, что выбранный варистор применим, когда номинальный ток  $I_{ном}$  протекающий через варистор,  $\leq 0,6$  А. Если это не так, то должен быть выбран варистор с большей нагрузочной способностью и диаметром.

Величина  $\tau$  может быть оценена при помощи соотношения

$$\tau \approx t_0 \approx L_s I_{ном} / U_{s\max}, \quad (10.6)$$

где  $U_{s\max}$  – перенапряжение при отключении катушки, полученное с помощью рис. 10.43. Уравнение (10.6) получается путем упрощения данного в табл. 10.9, столбец 4, соотношения для  $t_0$ .

Номинальный отводимый импульсный ток  $i_{н\text{ ном}}$   
металлоксидных варисторов для различного числа  $m$  коммутаций

Диаметр варистора, мм	$U_{\text{ном}}$ , В	$U_{\text{нб.раб.}}$ , В	Номинальный отводимый импульсный ток $i_{н\text{ ном}}$ для различного числа коммутаций $m$			
			$10^0$ , А	$10^2$ , А	$10^4$ , А	$10^6$ , А
5	95	125	200	50	20	10
7	95	125	500	125	50	25
10	95	125	500	125	50	25
10	95	125	1000	250	100	50
14	95	125	1000	250	75	25
14	95	125	2000	500	175	50
20	95	125	4000	1000	200	50
30	250	320	10000	2000	250	60

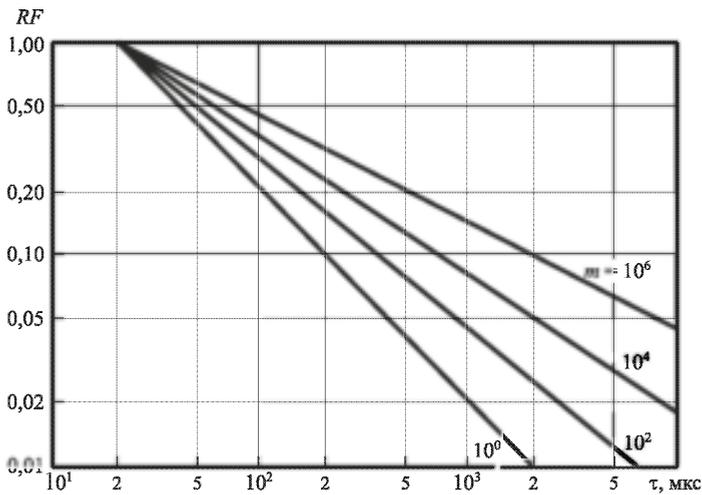


Рис. 10.44. Коэффициент уменьшения  $RF$   
для длительности импульса  $\tau > 20$  мкс

**Z-диоды.** Z-диоды (диоды Зенера) имеют асимметричную вольт-амперную характеристику (рис. 10.45а). Чтобы при включенном приборе через помехозащищающую цепь не протекало тока, включается встречно диод  $D$  (см. табл. 10.8, столбец 6). Величина требуемого  $U_Z$  Z-диода (рис. 10.45а) определяется по одной из пар величин:  $U_{s\text{ макс}}/U_{\text{ном}}$ ;  $t_z/3T_g$ . Обычно она выбирается в показанных на рис. 10.45б границах  $U_Z = (1,5-2,5)U_{\text{ном}}$ . Как правило Z-диод должен быть способен кратковременно проводить ток  $I_{\text{ном}}$  защищаемого прибора, т.е. выбран по

$$I_{Z\text{ макс}} \geq I_{\text{ном}} \quad (10.7)$$

и должен быть выбран по рассеиваемой энергии

$$W \geq \frac{L}{2} I_{\text{ном}}^2 \quad (10.8)$$

Определение параметров диода производится, как указано в столбце 1 табл. 10.10.

Z-диоды, хотя и имеют малое время срабатывания и обеспечивают эффективное ограничение перенапряжений при отключении, являются сравнительно дорогими. Их нагрузочная способность по импульсному току и возможность поглощения энергии, так же как и величина  $U_Z$ , ограничены, так что речь о них может быть только в небольших, управляемых полупроводниковыми схемами приборах, с низкими номинальными напряжениями,  $U_{\text{ном}} \leq (0,4-0,8)U_Z$ . Лучшими свойствами в этом отношении обладают специально разработанные для отвода переходных перенапряжений TAZ-диоды (переходные поглощающие стабилитроны).

**RC-цепочки.** Очень хорошими свойствами по ограничению перенапряжений при отключении, снижению производных напряжения, так же как для обеспечения малого времени срабатывания обладают соответствующим образом подобранные RC-цепочки. В простейшем случае они состоят из резистора  $R_p$  и конденсатора  $C_p$ , расположенные параллельно катушке индуктивности (табл. 10.10, столбец 6). При включении  $C_p$  быстро (постоянная времени заряда  $T_L = C_p R_p$ ) заряжается до номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ . После этого через цепь помехоподавления течет лишь ток утечки конденсатора, которым можно пренебречь.

RC-цепочка рассчитывается так, что в ней после отключения происходит затухающий колебательный разряд. Существуют следующие правила расчета:

$$R_p = (0,2-1)R_s, \quad (10.9)$$

причем, однако, нельзя переходить за нижнее граничное сопротивление  $R_p = U_s/I_{\text{ном}}$ , чтобы при включении не произошло сваривания контактов выключателя и

$$C_p \approx \frac{L_s}{4R_s^2}. \quad (10.10)$$

Цепь помехозащиты должна кратковременно проводить ток  $I_{\text{ном}}$ , а конденсатор должен быть рассчитан на 2–3-кратное номинальное напряжение. Поскольку в процессе разряда меняется направление тока, то используются, как правило, только металлобумажные конденсаторы.

**RCD-цепочки.** Еще одна помехозащитная комбинация, состоящая из последовательности диод – конденсатор – резистор, представлена в столбце 7 табл. 10.8. Конденсатор после отключения обмотки возбуждения заряжается до момента  $t_0$ . Смена направления тока через диод невозможна.  $C_p$  разряжается через  $R_E$ . Поскольку не возникает низкочастотных колебаний, этот вариант схемы специально подходит для выключателей. Устраняется повторное втягивание якоря. Основы расчета RCD-цепочки состоят в следующем.

Диод выбирается согласно табл. 10.8, столбец 2, емкость конденсатора рассчитывается по формуле

$$C_p \approx \frac{L_s}{(2-4)R_s^2}. \quad (10.11)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_{C_{\text{ном}}} = (2-3)U_{\text{ном}}. \quad (10.12)$$

$$R_E < \frac{T_p}{3C_p}. \quad (10.13)$$

где  $T_p$  – время паузы между двумя отключениями.

**Рекомендации по применению.** Если сравнить отдельные защитные схемы согласно данным в п. 10.8.3 критериям оценки, можно дать следующие рекомендации:

- если замедление времени возврата не играет роли, удобна диодная схема (табл. 10.8, столбец 2);
- если время реакции защищаемого прибора должно по возможности не изменяться, преимущество имеют комбинации с металлоксидными варисторами (табл. 10.8, столбец 5) или  $RC$ -цепочки (табл. 10.8, столбцы 7 и 8); для небольших приборов пригодны  $Z$ -диоды или  $TAZ$ -диодные схемы (табл. 10.8, столбец 6);
- резисторы (табл. 10.8, столбец 3) не годятся в качестве защиты от помех.

### 10.8.4 Схемы защиты от помех для устройств переменного тока

При отключении обмотки переменного тока нужно различать два граничных случая: разрыв цепи тока в момент перехода тока через нуль и в момент достижения максимального значения  $\sqrt{2} I_A$  ( $I_A$  – действующее значение установившегося тока). Второй случай представляет наихудшие соотношения при отключении для цепи переменного тока. При этом, как и в цепях постоянного тока, могут возникнуть высокие перенапряжения при отключении. В дальнейшем будет рассматриваться исключительно этот случай и он будет положен в основу определения параметров защитных схем. Возможные схемы помехозащиты в однофазных приборах переменного тока показаны в табл. 10.10.

**Резисторы.** Простейший, однако, для эффективной защиты от помех не слишком подходящий вариант схемы – это активное сопротивление параллельно индуктивности (табл. 10.10, столбец 2). Он используется только в отдельных случаях, в качестве временной меры. Сопротивление выбирается в границах

$$R_p = (2-4) R \frac{U_{\text{ном}}}{I_A} \quad (10.14)$$

и рассчитывается по длительному току  $I_{\text{п}} = U_{\text{ном}}/R_p$ .

**Варисторы.** Более подходящими, чем резисторы, являются варисторы (табл. 10.10, столбец 3), особенно металлоксидные. Перенапряжение при отключении удаётся при этом ограничить на защитном уровне – примерно 2–3 номинальных напряжения прибора. Выбор подходящего металлоксидного варистора осуществляется аналогично п. 10.8.3, при этом определяется наибольшее рабочее переменное напряжение  $U_{\text{нб.раб}}$  варистора (см. рис. 10.42) при учете возможного положительного отклонения  $\Delta U_{\text{ном}}$  от номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$

$$U_{\text{нб.раб}} \geq \left( 1 + \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right) = (1,1-1,2) U_{\text{ном}} \quad (10.15)$$

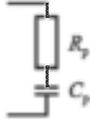
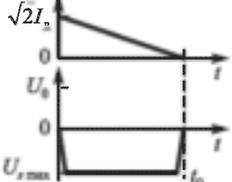
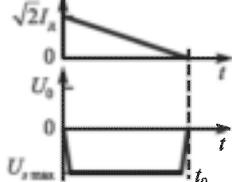
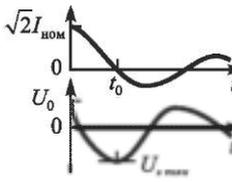
и рассчитывается максимально допустимая мощность потерь

$$P_{\text{п.макс}} \geq \frac{U_{\text{ном}} I_A}{2\pi f}. \quad (10.16)$$

## Обзор свойства важнейших схем

Схема защиты и ее характеристики	Схема защиты с резистором	Схема защиты с варистором
1	2	3
<p>Импульс тока <math>i</math></p> <p>Импульс напряжения <math>U_s</math></p>		
Максимальное перенапряжение при отключении катушки	$U_{s,max} = -\sqrt{2}R_p I_n$	$U_{s,max} = -k(\sqrt{2}I_n)^{1/a}$
Время уменьшения тока до нуля	$t_0 \approx \frac{3T_s}{\left(1 - \frac{U_{s,max}/U_{НОМ}}{\sqrt{2} \cos \varphi_d}\right)}$	$t_0 \approx \frac{aT_s/(a-1)}{\left(\frac{-U_{s,max}/U_{НОМ}}{\sqrt{2} \cos \varphi_d}\right)}$
Реализуемые отношения $U_{s,max}/U_{НОМ}$ $t_0/3T_s$	<p>-3...-5</p> <p>0,3-0,05</p>	<p>-1,5...-3</p> <p>0,15-0,015</p>
Потребляемый стационарно ток	$I_n = \frac{U_{НОМ}}{R_p} = \frac{\sqrt{2}I_d}{(-U_{s,max}/U_{НОМ})}$	При MOV – пренебрежимо, SiC-варисторы
Формулы для расчета параметров	$R_p + (2-4) \frac{U_{НОМ}}{I_n}$ <p>измеренное для <math>I_n</math></p>	$U_{нб,раб} > (1,1-1,2)U_{НОМ};$ $P_{п,max} \geq \frac{U_{нб,раб}}{2\pi f} z;$ $\hat{i}_{н,ном} RF > \sqrt{2}I_d$ $\hat{i}_{н,ном} \text{ по табл. 10.2;}$ $RF \text{ по рис. 10.7}$
Примечания	Высокий ток потерь, в качестве схемы защиты от помех не пригоден	Очень хорошая помехозащита, можно монтировать непосредственно на катушке

## помехозащиты для приборов переменного тока

Двухсторонний TAZ-диод	Селеновый ограничитель перенапряжений	RC-цепочка
4	5	6
	 Селеновый ограничитель перенапряжений	
		
$U_{s\max} = -U_Z$	$U_{s\max} = -U(\sqrt{2}I_d)$	$U_{s\max} = -\sqrt{2}I_d \sqrt{\frac{L_p}{C_p}}$
$t_0 \approx \frac{T_s}{\left( \frac{-U_{s\max}/U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{2} \cos \varphi_d} \right)}$	$t_0 \approx \frac{T_s}{\left( \frac{-U_{s\max}/U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{2} \cos \varphi_d} \right)}$	$t_0 \approx \frac{\pi}{2} \frac{T_s}{\left( \frac{-U_{s\max}/U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{2} \cos \varphi_d} \right)}$
<p>-1,5...-3 0,15-0,015</p>	<p>-1,5...-3 0,15-0,015</p>	<p>-1...-3 0,25-0,06</p>
$I_{\text{II}} \approx 0$	$I_{\text{II}} \text{ пренебрежим}$	$I_{\text{II}} = \frac{2\pi f C_p U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{1 + (2\pi f C_p R_p)^2}}$
$U_Z > \sqrt{2}U_{\text{НОМ}};$ $P_{\text{пmax}} \geq \frac{U_{\text{НОМ}} I_d}{2\pi f};$ $I_{Z\text{max}} k \geq \sqrt{2}I_d$ $I_{Z\text{max}} \text{ и } k - \text{паспортные данные}$	<p>Требуемое число пластин для каждого направления:  <math>n \geq U_{\text{НОМ}}/U_{\text{д,пл}}</math>            Требуемая площадь пластины  <math>A_p \geq \sqrt{2}I_d U</math>  <math>U_{\text{д,пл}} = (25-50) \text{ В}</math>  <math>J = (4-5) \text{ А/см}^2</math></p>	$C_p \approx \frac{I_d}{8\pi f U_{\text{НОМ}}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi};$ $U_{C\text{НОМ}} = (2-3)U_{\text{НОМ}}$ $R_p \oplus 0,2 \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_d}$
<p>Очень хорошая помехозащита, дорогая, только для малых приборов с напряжениями</p> $U_{\text{НОМ}} < \frac{U_Z}{\sqrt{2}}$	<p>Занимает много места, преимущественно для больших приборов</p>	<p>Очень хорошая помехозащита, компенсирующая реактивный ток, часто применяется</p>

В табл. 10.12 приняты следующие обозначения:  $R_s, L_s, C_s, T_s = L_s/R_s$  – сопротивление, индуктивность, емкость и постоянная времени обмотки;  $I_{\text{уст}}$ ,  $U_{\text{ном}}$  – установившийся ток и номинальное напряжение защищаемого прибора (эффективные значения);  $\cos \varphi = I_{\text{уст}} R_s / U_{\text{ном}}$  – коэффициент мощности прибора;  $f$  – частота сети;  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток включения выключателя  $S$ ;  $I_{\text{п}}$  – ток потерь (эффективное значение);  $I_{Z \text{ max}}$  – максимально допустимый ток;  $MOV$  – металлоксидный варистор;  $U_{C \text{ ном}}$  – номинальное напряжение конденсатора;  $U_{\text{нб раб}}$  – верхнее рабочее переменное напряжение варистора;  $U_Z$  – напряжение (рис. 10.45а);  $z$  – число отключений в единицу времени;  $a$  – коэффициент нелинейности варистора.

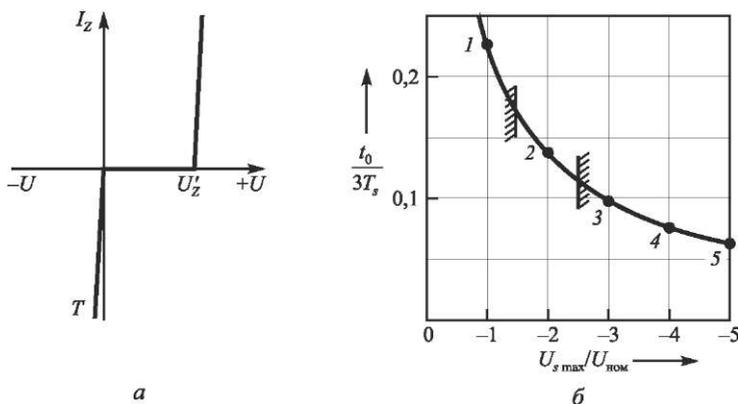


Рис. 10.45. Характеристики Z-диодов:

а – вольт-амперная характеристика;  
 б –  $t_0 / 3T_s = f(U_{s \text{ max}} / U_{\text{ном}})$  согласно табл. 10.10, столбец 6

По  $U_{\text{нб раб}}$  (10.15) и  $P_{\text{п max}}$  (10.16) предварительно выбирается соответствующий тип варистора. Ожидаемое при отключении перенапряжение  $U_{s \text{ max}}$  может быть получено из вольт-амперной характеристики для  $\sqrt{2} I_{\text{п}}$  (см. рис. 10.6).

Таким же образом, как и в п. 10.8.3, нужно проверить, не превышает ли максимально допустимый импульсный ток выбранного варистора, т.е. насколько обеспечивается условие:

$$i_{\text{и max}} = i_{\text{и ном}} \geq \sqrt{2} I_{\text{д}}. \quad (10.17)$$

Значения  $i_{\text{и ном}}$  и  $RF$  могут быть взяты из табл. 10.9 или рис. 10.44. Необходимая для определения  $RF$  длительность импульса  $\tau$  может быть оценена по соотношению

$$\tau \approx t_0 \approx \frac{\sqrt{2} U_{\text{ном}}}{U_{s \text{ max}}}. \quad (10.18)$$

Уравнение (10.18) соответствует упрощенному, данному в табл. 10.10, столбец 3, выражению для  $t_0$ .

**Z-диоды и супрессор-диоды.** Очень хорошими свойствами обладают схемы защиты от помех из двух включенных встречно Z-диодов или двустороннего TAZ-диода (табл. 10.10, столбец 4). TAZ-диоды выполнены специально для ограничения переходных перенапряжений и по сравнению с нормальными Z-диодами обладают повышенной стойкостью к импульсному току. Преимущество схемы с Z-диодами состоит в том,

что они при сильном ограничении перенапряжений практически не влияют на время возврата защищаемого прибора. Однако их цена высока. Кроме того, они не применимы для больших токов и напряжений, и поэтому используются в маленьких приборах.

**Определение параметров Z-диодов и супресс-диодов.** Напряжение  $U_Z$  (рис. 10.45а) выбирается согласно соотношению

$$U_Z > \sqrt{2}U_{\text{ном}}. \quad (10.19)$$

Требуемая нагрузочная способность определяется  $P_{\text{п max}}$  с помощью уравнения

$$P_{\text{п max}} \geq \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{д}}}{2\pi f} z \quad (10.20)$$

(обозначения см. табл. 10.10).

В заключение, как и при металлоксидных варисторах, проверяется, не превышает ли нагрузочная способность выбранных по (10.19) и (10.20) диодов соотношение

$$I_{Z \text{ max}} k_R \geq \sqrt{2} I_{\text{д}}, \quad (10.21)$$

где  $I_{Z \text{ max}}$  – максимально допустимая амплитуда тока при определенном импульсном токе;  $k_R$  – понижающий коэффициент, предусматривающий другую длительность импульса.

**Селеновые ограничители перенапряжений.** Селеновые ограничители перенапряжений – это селеновые выпрямители с особо крутой характеристикой запирания, которые могут кратковременно нагружаться в прямом и обратном направлениях очень высокими плотностями тока (до 5 А/см<sup>2</sup>). При встречном включении двух пластин они имеют такие же свойства, как и варисторы или TAZ-диоды. Они, однако, занимают больше места и поэтому преимущественно применяются в больших установках.

Требуемое для каждого направления число  $n$  пластин получается из номинального напряжения прибора  $U_n$

$$n \geq U_{\text{ном}} / U_{\text{д пл}}, \quad (10.22)$$

где  $U_{\text{д пл}} \approx (25-50)$  В – действующее значение напряжения одной пластины.

Требуемая площадь пластины вычисляется, как

$$A_p \geq \sqrt{2} I_{\text{и.о}} / J, \quad (10.23)$$

где  $I_{\text{и.о}}$  – импульсный ток через ограничитель и  $J = 5$  А/см<sup>2</sup> – допустимая плотность импульсного тока.

**RC-цепочки.** При переменном токе простые RC-цепочки (табл. 10.10, столбец 6) обладают хорошими свойствами ограничивать перенапряжения при отключении и обеспечивать короткое время возврата, связанное с уменьшением производной напряжения. Расчет их параметров производится так, чтобы при отключении возникало затухающее колебание. Это обеспечивается при

$$R_p \approx 0,2 \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{и.о}}} > \frac{\sqrt{2}U_{\text{ном}}}{I_{\text{доп}}}, \quad (10.24)$$

чтобы избежать сваривания контактов выключателя, и

$$C_p \approx \frac{1}{8\pi f} \frac{I_{\text{и.о}}}{U_{\text{ном}}} \sqrt{1 - \left( \frac{R_p I_{\text{и.о}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2}. \quad (10.25)$$

Сопротивление  $R_p$  должно выдерживать длительный ток потерь

$$I_{\text{п}} = \frac{2\pi f C_p U_{\text{ном}}}{\sqrt{1 + (2\pi f C_p R_p)^2}}, \quad (10.26)$$

а емкость  $C_p$  выдерживать напряжение, в 2–3 раза превышающее номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ .

Длительный ток через  $RC$ -цепочку будет предотвращен, если дополнительно используется вспомогательный выпрямитель (см. рис. 10.39).

**Рекомендации по применению.** Для практического применения средств защиты от помех для приборов переменного тока на основе введенных в п. 10.8.2 критериев можно дать следующие рекомендации.

$RC$ -цепочки (табл. 10.10, столбец 6) являются очень выигрышными, особенно для приборов 220 и 380 В. Они приемлемы по цене, занимают не слишком много места, одновременно компенсируют реактивный ток и гарантируют время возврата прибора такое же, как при отсутствии схемы защиты, даже в наиболее неблагоприятный момент включения при хорошем ограничении перенапряжения.

Металлоксидные варисторы имеют такие же хорошие свойства (табл. 10.10, столбец 3). Для защиты выключателей существуют особо компактные варисторы. Селеновые ограничители перенапряжений (табл. 10.10, столбец 5) пригодны для больших приборов. Двусторонние  $Z$ -диодные схемы (табл. 10.10, столбец 4), разработаны специально для малых и очень малых устройств.

Резисторы (табл. 10.10, столбец 2) не пригодны в качестве защиты от помех приборов переменного тока.

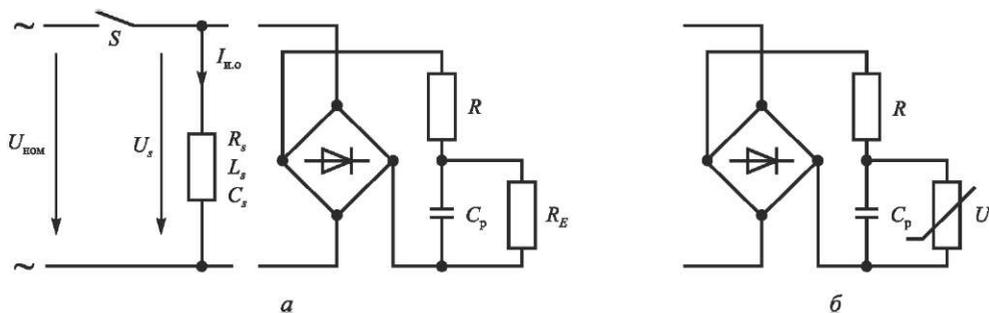


Рис. 10.46.  $RC$ -схемы со вспомогательным выпрямителем:

*a* – с разрядным резистором;

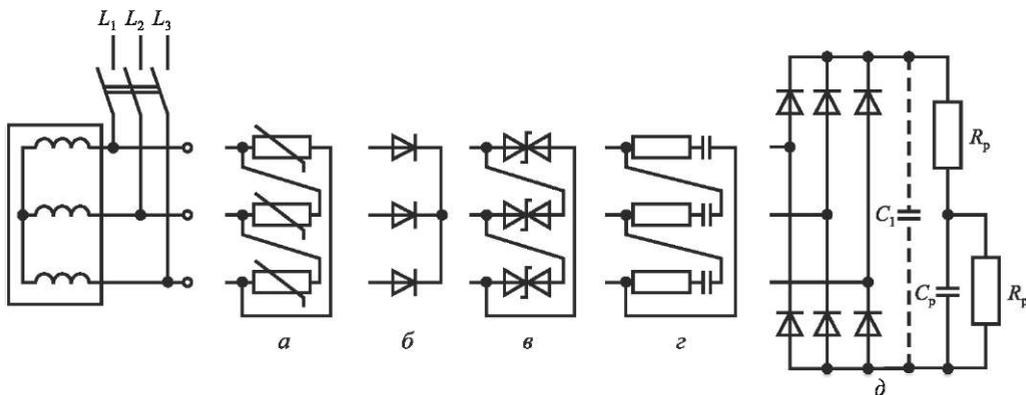
*б* – с варистором в качестве разрядного сопротивления

### 10.8.5. Схемы защиты от помех для трехфазных установок

Для трехфазных магнитов и других установок, таких, как зажимные приспособления, тормоза, трехфазные асинхронные двигатели и т.д. могут быть использованы похожие схемы ограничения перенапряжений, как и в однофазных устройствах; их расчет ведется аналогично описанному в п. 10.8.4.

Очень выгодными также являются элементы, имеющие сильно нелинейные вольт-амперные характеристики, т.е. схемы с металлоксидными варисторами (рис. 10.47а) или с Z-диодами, а также TAZ-диодами и с селеновыми ОП (рис. 10.47в). Ток утечки во всех трех случаях пренебрежимо мал.

Очень хорошим помехоподавляющим действием обладают также и RC-цепочки, соединенные в треугольник (рис. 10.47д) или звезду, присоединяемые к выводам трехфазного прибора. Особое преимущество RC-схем состоит в том, что они снижают как амплитуду, так и производную перенапряжения при отключении.



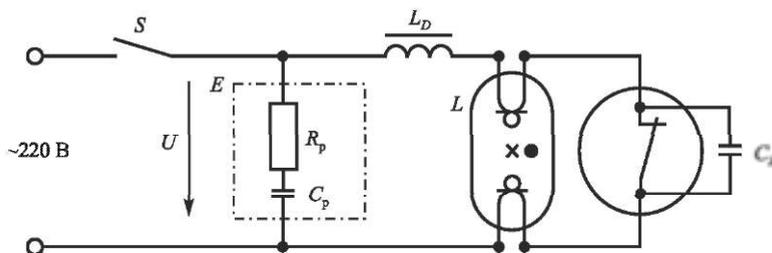
**Рис. 10.47. Схемы защиты от помех трехфазных приборов:**

*а* – варисторы; *б* – Z-диоды или селеновые диоды;  
*в* – двусторонние TAZ-диоды или селеновые ограничители; *г* – RC-звенья;  
*д* – RC-звенья со вспомогательным выпрямителем

Схожие подобно симметричным RC-схемам свойства имеют защитные схемы, состоящие из RC-звена и вспомогательного выпрямительного моста (рис. 10.47д). Стационарные потери мощности здесь устраняются практически полностью. Схемы защиты от помех такого рода предпочтительны для устройств большой мощности. Как правило, конденсатор  $C_p$  дополняется резистором или варистором  $R_E$ , и включенным параллельно для подавления очень высокочастотных составляющих перенапряжения небольшим, имеющим крайне малую индуктивность конденсатором  $C_1$ .

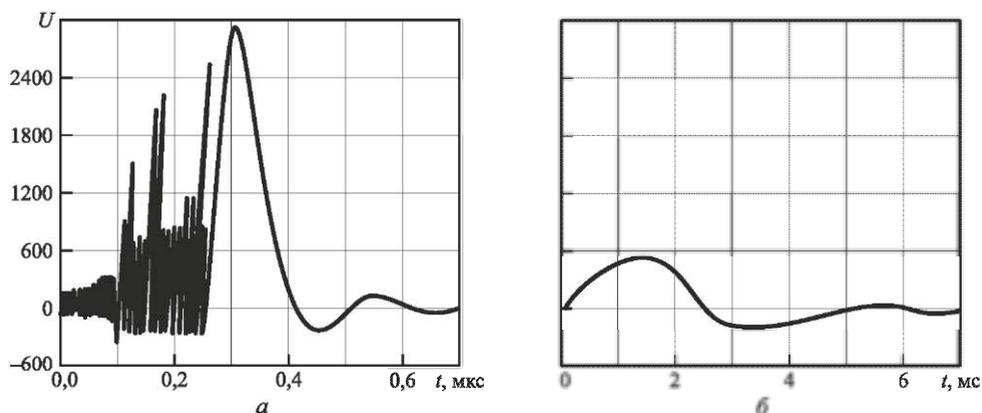
### 10.8.6. Схемы защиты от помех для люминесцентных ламп

Люминесцентные лампы низкого давления (рис. 10.48), очень часто устанавливаемые в качестве рабочего освещения в непосредственной близости от электронных установок, часто выступают в качестве неприятных источников помех как при включении, так и при их отключении. В особенности следует ожидать интенсивные помехи при отключении в неудачный момент (прерывание в момент максимума тока) (рис. 10.49а и табл. 10.11). При этом может быть полезной, как и при электромагнитных приборах, защитная RC-комбинация, установленная в непосредственной близости от лампы. Помехи в этом случае могут быть снижены до приемлемого уровня (рис. 10.49б и табл. 10.11). Возможно также применение варисторов из металлоксида (табл. 10.8, столбец 5).



**Рис. 10.48. Цепь тока люминесцентной лампы:**

$C_p$  – емкость помехоподавляющего звена  $E$  (МБ-конденсатор 0,47 мкФ, 630 В);  $C_z$  – емкость помехоподавления на стартере;  $D$  – дроссель предварительного включения;  $E$  – помехоподавляющее устройство;  $L$  – люминесцентная лампа;  $L_0$  – индуктивность дросселя  $D$ ;  $R_p$  – активное сопротивление устройства  $E$ ; (проволочный резистор 470 Ом, 250 В, 4 Вт, 5%);  $S$  – выключатель;  $Z$  – стартер



**Рис. 10.49. Процесс отключения люминесцентной лампы мощностью 40 Вт:**

$a$  – некомпенсированный, помехи не подавляются;  
 $b$  – помехи подавлены согласно рис. 10.48

Таблица 10.11

**Параметры процесса отключения люминесцентной лампы мощностью 40 Вт**

Люминесцентная лампа низкого давления LS 40	$U_{max}$ , В	$(dU/dt)_{max}$ , В/мкс	$f_a$ , кГц	$f_n$
Некомпенсированная, помехи не подавляются	3000	111	5	100–500 кГц с наложением частот до 10 МГц
Со схемой защиты по рис. 10.47	600	0,77	0,2	–

## ***Вопросы для самопроверки***

1. Назовите классификацию типовых сигналов в порядке уменьшения чувствительности оборудования к внешним возмущениям.
2. Нарисуйте план подстанции ВН и соответствующие виды электромагнитного окружения.
3. Нарисуйте план типовой электростанции и соответствующие виды электромагнитного окружения.
4. Перечислите основные положения правил выполнения заземления и прокладки кабелей.
5. В каких случаях применяются параллельные заземленные проводники?
6. Каким образом выполняется заземление вторичных цепей ТТ и ТН, связывающих их с релейным щитом?
7. Каким образом осуществляется экранирование зданий?
8. Как выполняется заземление на электрических станциях?
9. Перечислите особенности ЭМС на ПС и ЭС.
10. Каковы уровни испытательных воздействий на оборудование ЭС и ПС?
11. В чем состоят особенности проектирования заземляющих систем комплектных КРУЭ?
12. Какие особенности электромагнитных помех, возникающих при коммутациях тока в цепях с индуктивностью?
13. Объясните методы защиты от помех в устройствах постоянного тока.
14. Объясните методы защиты от помех в устройствах переменного тока.
15. Какие методы защиты от помех используются в трехфазных установках?
16. Объясните функционирование устройств защиты от помех, создаваемых люминесцентными лампами.

---

---

# **ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ ВН И СВН И ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

---

---

При сооружении воздушных линий (ВЛ) электропередачи переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения (ВН и СВН) большое внимание должно уделяться ограничению их влияния на окружающую среду и выполнению требований санитарно-нормативных документов. ВЛ СВН – один из основных непрерывно действующих источников электромагнитного поля (ЭМП). Следствием ЭМП, создаваемого ВЛ, являются электромагнитные помехи, затрудняющие нормальную работу ряда технических объектов (радио- и телеприемников, линий связи и т.д.). Индуцированные ВЛ токи и напряжения представляют реальную опасность для человека в момент его прикосновения под линией электропередачи к крупногабаритной машине (трейлеру, комбайну, автокрану, автобусу и т.д.) на резиновом ходу. Корона на проводах ВЛ порождает акустический шум, который в некоторых случаях может оказаться доминирующим источником шума. Строительство ВЛ сопряжено также с вырубкой леса, созданием просек в лесных массивах и т.п., что приводит к дополнительному ущербу и может нарушать экологический баланс в природе.

В последние десятилетия особенно актуальной стала проблема влияния ВЛ в условиях населенной местности, так как трассы многих ВЛ СВН, построенных в 1960-е и 1970-е годы, оказались в черте и ближайшем окружении крупных городов, как это, например, произошло в Подмосковье.

Учет факторов влияния ВЛ СВН переменного тока на окружающую среду во многом определяет выбор технических и конструктивных решений.

В этой связи особое значение приобретают экологические аспекты электромагнитной совместимости.

### **11.1. Экологические аспекты электромагнитной совместимости**

#### **11.1.1. Роль электрических процессов в функционировании живых организмов**

Живые организмы, включая организм человека, представляют собой исключительно сложные системы, функционирование которых обеспечивается разнообразными процессами – физическими, химическими, биологическими, регулирующими внутренне

условия функционирования живых организмов, их воспроизводство, мыслительную деятельность человека и многое другое. В основе реализации этих процессов лежат электрические влияния на молекулярном и клеточном уровнях.

По структуре живой организм, как правило, состоит из совокупности клеточных тканей, образующих мышечную, кровеносную, лимфатическую, нервную и иные системы. Внутренняя среда организма является электропроводящей. В ней, представляющей собой водные электролиты, осуществляется транспорт ионов, молекул, циркулируют электрические токи, которыми возбуждаются, определяются и регулируются все жизненно важные процессы. Токи возбуждаются электрическими полями, создаваемыми ионами, концентрация которых зависит от вида химических реакций, протекающих в организме, вида и скорости обменных процессов и т.д.

Следует отметить ключевую роль электрических процессов и в двигательных функциях мышечных тканей. В них на заключительном этапе сложных биохимических процессов осуществляется преобразование энергии электрического поля в механическую работу.

Нормальное функционирование клеток организма связано с обменом веществ через мембраны. Обмен осуществляется путем открытия каналов в мембране, через которые проходят ионы натрия, кальция, хлора и других элементов. Открытие каналов происходит за счет электростатических сил, действующих на белковые молекулы мембраны, при изменениях напряжения между стенками мембраны вследствие различия концентраций ионов внутри и снаружи клетки. Изменения концентрации ионов снаружи клетки и возникновение потенциала действия являются неотъемлемыми элементами механизмов электрохимической передачи информации по тканям. В спокойном состоянии напряжение составляет примерно 80 мВ. Для того чтобы каналы мембраны оказались прозрачными для ионов натрия, достаточно уменьшить напряжение на 20 мВ. С учетом электропроводности и структуры нервных тканей этому состоянию соответствуют усредненные напряженность электрического поля в организме человека 40 В/м и плотность тока 4 А/м<sup>2</sup>. Если внутри тела человека искусственно создать указанные поле или плотность тока, то будут нарушены естественные процессы функционирования органов, например наступит паралич нервных тканей или нарушится ритм сокращений сердечной мышцы. Таким образом, указанные значения напряженности поля или плотности тока являются безусловно опасными.

Поле внутри тела может быть создано как при непосредственном касании человеком токоведущих частей, так и за счет протекания по телу токов смещения, если человек находится в переменном электрическом поле, или в поле индуктированных токов при нахождении в переменном магнитном поле. Указанной напряженности поля или плотности тока внутри тела соответствует напряженность внешнего электрического поля промышленной частоты 100 МВ/м или магнитного поля примерно 1 МА/м. Следует отметить, что ни магнитные, ни электрические поля указанной напряженности на практике не встречаются и случаев непосредственного поражения человека магнитным или электрическим полем промышленной частоты не зарегистрировано.

Однако правоверен вопрос, при каких напряженностях внешних полей возможно негативное или позитивное влияние на человека электромагнитных возмущений, создаваемых электрическими, электронными и иными приборами, в которых используется электрическая энергия. В организме человека при нахождении в электрическом,

магнитном или электромагнитном внешних полях, индуктируются токи, накладывающиеся на собственные биотоки, в результате чего могут измениться естественные процессы или возникнуть новые явления.

Постоянные внешние электрические поля не могут вызвать токов в организме. Единственным следствием воздействия таких полей может быть возникновение электрических зарядов на поверхности тела. Постоянные магнитные поля проникают внутрь организма без изменения, так как в организме отсутствуют ферро- или диамагнитные образования.

Переменные электрические и магнитные поля вызывают соответственно токи смещения и индуктированные токи. Для оценки возможного влияния этих токов на организм необходимо сопоставить их амплитуды и частоты с аналогичными параметрами естественных биотоков.

Электромагнитные поля высокой частоты также способны индуктировать токи в организме. Появление этих токов, безусловно, является новым, влияющим на процессы в организме, фактором, так как в естественных условиях высокочастотные токи в организме отсутствуют.

Поскольку электрические, магнитные и электромагнитные поля становятся все более сильным фактором искажения окружающей среды и достоверно известны некоторые конкретные механизмы воздействия полей на человека, в зарубежной печати появилось новое определение этому явлению – электросмог. В загрязнение окружающего пространства электрическими и магнитными полями промышленной частоты основной вклад вносят объекты электроэнергетики, в первую очередь линии электропередачи и подстанции высокого напряжения, электрифицированный транспорт, мощные промышленные установки, а также разнообразные бытовые электроприборы.

Проблема электромагнитной обстановки как фактора негативного влияния на самочувствие и здоровье человека привлекает все большее внимание общественности, причем часто опасность преувеличивается из-за недостатка знаний в этом вопросе либо по конъюнктурным соображениям, таким как стремление найти рынки сбыта устройств для измерения параметров полей или устройств и методов ослабления напряженности полей.

В связи с развитием электроэнергетики, с непрерывно расширяющимся применением мощных электротехнических и электронных устройств на производстве, транспорте и в быту искажения электромагнитной обстановки становятся все более заметным, а напряженности электрических и магнитных полей на рабочих местах, например на объектах электроэнергетики, могут существенно превышать значения естественных полей.

Изучению влияния электромагнитной обстановки на состояние здоровья человека в последние годы придается большое значение. Оно обусловлено, в частности, появлением сообщений о повышенном риске раковых заболеваний у людей, длительно проживающих вблизи линий электропередачи высокого напряжения, что связывается с влиянием на организм человека магнитного поля, создаваемого токами в проводах линий; жалобами персонала объектов электроэнергетики напряжением выше 220 кВ на ухудшение самочувствия при длительном воздействии электрических и магнитных полей промышленной частоты на рабочих местах и т.п.

Как в научных трудах, так и в средствах массовой информации все чаще появляются сенсационные материалы об опасности для здоровья электрических, магнитных и электромагнитных полей, в том числе и слабых, но длительно действующих. Например, появляются безосновательные утверждения, что опасной для человека границей является напряженность магнитного поля промышленной частоты 0,16 А/м при нормированной за рубежом напряженности 80 А/м и более. Как правило, фактическая база таких утверждений оказывается недостоверной. Однако интерес к этой проблеме не ослабевает, так как существует вероятность недооценки опасного влияния полей на здоровье и повторения ситуации, сходной с той, которая складывалась при недооценке опасности ионизирующих излучений.

Упомянутые проблемы находятся в поле зрения многих международных организаций, таких как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международная ассоциация по защите от ионизирующих излучений (IRPA), Европейский комитет по нормированию в области электротехники (CENELEC), Комиссии европейского союза (CEU), национальные комиссии и т.д., занимающихся вопросами нормирования воздействующих на персонал и население электрических, магнитных и электромагнитных полей, включая поля промышленной частоты.

Согласно многочисленным исследованиям воздействия полей на человека неопасной считается плотность тока в организме  $\sim 10$  мА/м<sup>2</sup>, что соответствует при частоте 50 Гц напряженности внешних полей 20 кВ/м и 4 кА/м. При больших плотностях наблюдаются такие последствия, как обратимые изменения скорости синтеза протеинов и ДНК, нарушения ионного равновесия, концентрации промежуточных продуктов обмена и активных веществ в клетках, изменения процессов деления клеток и т.п. При плотностях тока 100–1000 мА/м<sup>2</sup>, могут происходить сильные возбуждения клеток и тканей, центральной нервной системы, возникают болевые ощущения, а при больших плотностях тока возможны аритмия и фибрилляция сердца. Интересно отметить, что напряженность полей, кратковременно создаваемых приборами электротерапии в организме человека, как правило, выше границы восприимчивости (ощущения человеком наличия поля), а при работе дефибриллятора в сердечной мышце создается импульсное поле напряженностью  $\sim 600$  В/м, что соответствует плотности тока  $\sim 60$  А/м<sup>2</sup>. Таким образом, следует четко различать возможные негативные или позитивные последствия электрических и магнитных полей в зависимости от их напряженности и экспозиции.

Плотность тока  $\sim 10$  мА/м<sup>2</sup> в теле человека считается уровнем естественных биотоков. Все клетки нормально функционируют при такой плотности тока. Частоты биотоков, как правило, лежат в диапазоне 4–1000 Гц. Регистрация сигналов, связанных с биотоками (электрокардиограммы, энцефалограммы) является эффективным средством диагностики состояния организма человека.

Более удобным для пользования является не плотность тока, а ток, протекающий через тело по направлению рука–рука. Безопасный для человека ток зависит от времени его воздействия. Согласно ГОСТ 12.1.038 эти зависимости для производственных и бытовых условий приведены в табл. 11.1.

Используя эти нормированные токи, можно оценить внешние поля, которые создают указанные в табл. 11.1 токи. Такие оценки, как уже отмечалось, при времени

воздействия более 1 с дают значения 25 кВ/м и 4 кА/м. При сокращении времени воздействия предельно допустимые напряженности полей возрастают примерно на 2 порядка, при этом напряженность электрического поля становится выше напряженности, при которой произойдет электрический пробой по воздуху вдоль тела человека. Вероятно, этим объясняются случаи разряда генератора импульсных напряжений в лабораториях на человека, не приводящих к летальному исходу.

Таблица 11.1

**Предельно допустимые токи через тело человека  
в зависимости от времени протекания при частоте 50 Гц, мА**

Условия	Время протекания, с											
	0,01–0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Более 1,0
Производственные	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Бытовые	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

Учитывая важную роль электрических процессов в функционировании организма человека, возможное влияние на организм внешних полей, создаваемых электрическими и электроэнергетическими устройствами, далее рассмотрим электромагнитную обстановку, окружающую человека на производстве и в быту, механизмы воздействия полей на организм, а также некоторые вопросы нормирования допустимых напряженностей.

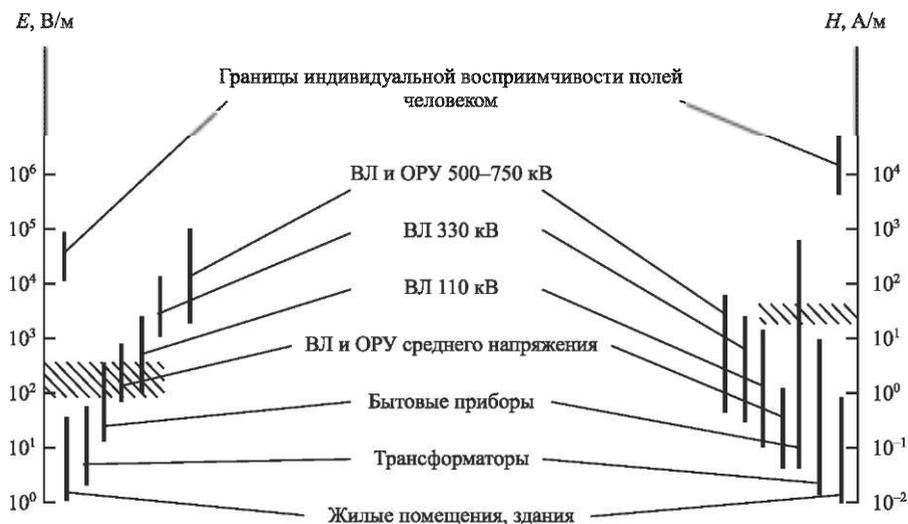
**11.1.2. Электромагнитная обстановка  
на объектах ВН и СВН и в быту**

Электромагнитная обстановка характеризуется напряженностями электрического и магнитного полей. При высоких частотах речь может идти о воздействии электромагнитного поля, при этом наибольший интерес представляет воздействие плоской электромагнитной волны, при которой плотности энергии электрической и магнитной составляющих равны.

Подразделяют естественную электромагнитную обстановку и обстановку от электрических, электроэнергетических и иных, созданных человеком устройств, в которых используется электрическая энергия. Поля естественного и искусственного происхождения накладываются друг на друга, векторы напряженностей суммируются.

Естественное электрическое поле Земли обусловлено отрицательным избыточным зарядом поверхности и составляет на открытой местности примерно 100–500 В/м, (см. заштрихованную область в левой части рис. 11.1). При наличии грозового облака напряженность поля может возрасти до нескольких десятков и даже сотен киловольт на метр, менять направление, а при грозовых разрядах возникают импульсы электромагнитного поля.

Сильные электрические поля промышленной частоты в основном создаются объектами электроэнергетики (линии электропередачи высокого напряжения).



**Рис. 11.1. Характерные напряженности электрических и магнитных полей промышленной частоты**

Здания экранируют постоянное электрическое поле Земли и электрическое поле промышленной частоты, созданное линиями электропередачи высокого напряжения и иными объектами. Внутри зданий постоянное электрическое поле как естественного, так и искусственного происхождения определяется, в основном, наличием электризующихся природных и синтетических материалов, являющихся основой для покрытий полов, мебели, одежды, обуви и т.д. Напряженность электростатического поля в помещении может достигать десятков и сотен кВ/м. При разрядах статического электричества наблюдаются электромагнитные импульсы с очень высокой крутизной. Возникают сильные электрические поля вблизи некоторых приборов, не имеющих специальной защиты и использующих высокое постоянное напряжение (телевизоры, мониторы, осциллографы и т.д.).

Постоянное магнитное поле Земли создается токами внутри нее. Оно ориентировано относительно магнитных полюсов. Напряженность магнитного поля зависит от географических координат и составляет 55,7 А/м у магнитных полюсов и 33,4 А/м у магнитного экватора, где вектор напряженности параллелен поверхности Земли. В средних широтах напряженность составляет примерно 40 А/м. Значения напряженности постоянного магнитного поля Земли лежат в пределах заштрихованной зоны в правой части рис. 11.1. На постоянное поле накладывается медленно изменяющееся геомагнитное поле, порожденное токами в магнитосфере и ионосфере, содержащее широкий спектр частот, в том числе и низкочастотную (до 100 Гц) составляющую напряженности до 0,1 А/м. Во время магнитных бурь, причиной которых являются процессы усиления солнечной активности, амплитуда низкочастотной составляющей многократно возрастает.

Геомагнитные постоянные и низкочастотные поля, в отличие от электрических, не экранируются стенами зданий и другими объектами, за исключением изготовленных из ферромагнитных материалов. Внутри зданий, имеющих стальной каркас, напряженность геомагнитного поля снижается в несколько раз.

Представление о типичных напряженностях электрического и магнитного полей на объектах электроэнергетики дают рис. 11.1 и табл. 11.2. В таблице приведены граничные значения напряженностей, воспринимаемых человеком, вызывающих нарушение ритма сокращений сердечной мышцы; напряженность электрического поля, приводящая к пробое воздушных промежутков, а также некоторые нормированные напряженности по данным ВОЗ, IRPA и DIN VDE (немецкие промышленные нормы Союза немецких электротехников).

Таблица 11.2

### Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики

Наименование объекта или параметра	Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м
ОРУ 500, 750 кВ	$10^3-5 \cdot 10^4^*$	10–100*
ВЛ 380 кВ	$10^3-10^4$	1–40
ВЛ 330 кВ	$10^3-5 \cdot 10^3^*$	10–100*
ВЛ 110 кВ	$10^2-3 \cdot 10^3^*$	0,1–20*
ВЛ 6-35 кВ	$10-5 \cdot 10^2$	0,1–2
Шинный мост 6 кВ	$10^{3^*}$	40–100*
ЗРУ 6 кВ	–	200*
Жилые помещения, здания	1–100	0,01–0,5
Электробытовые приборы	5–500	0,1–300
Порог индивидуальной восприимчивости	$10^4-2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3-3 \cdot 10^4$
Нарушение ритма сокращений сердечной мышцы	$5 \cdot 10^7$	$10^6$
Электрическая прочность воздушных промежутков	$5 \cdot 10^5-3 \cdot 10^6$	–
Расчетные и экспериментальные безопасные напряженности по условиям возбуждения клеток организма	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$
Нормативные напряженности по данным ВОЗ, IRPA с учетом возможных воздействий на организм	$5 \cdot 10^3$	80
То же по данным DIN VDE	$7 \cdot 10^3$	320

\* Данные, полученные авторами.

Как видно из рис. 11.1 и табл. 11.2, сильные электрические поля промышленной частоты в основном создаются объектами электроэнергетики (линии электропередачи высокого напряжения, сборные шины подстанций, трансформаторы и аппараты высокого напряжения). В остальных случаях электрические поля имеют относительно невысокие напряженности. Некоторое представление о напряженности таких полей дает рис. 11.1, где приведены усредненные данные, полученные в результате анализа

многочисленных отечественных и зарубежных публикаций, а также непосредственных измерений авторов под воздушными линиями электропередачи (ВЛ) и на открытых распределительных устройствах (ОРУ) 500 и 750 кВ.

Напряженность вблизи ВЛ 220 кВ и выше может достигать границы индивидуальной восприимчивости поля, когда человек по косвенным признакам (шевеление волос, ощущение покалывания при микроразрядах между телом и одеждой и т.д.) может установить наличие поля. Напряженность электрических полей, создаваемых бытовыми электроприборами, проводами систем электропитания, по амплитуде меньше, чем естественная напряженность постоянного поля Земли на открытой местности.

Таким образом, магнитная обстановка внутри помещений в основном определяется постоянным полем Земли, на которое накладываются переменные поля. Амплитуда этих полей может иметь такой же порядок величин, что и переменная составляющая естественного магнитного поля Земли.

Напряженность магнитного поля промышленной частоты внутри помещений может быть достаточно высокой, если вблизи проходит ВЛ электропередачи, проложены силовоточные кабели или расположены мощные электротехнические устройства (см., например, рис. 11.5).

Напряженность поля, созданного ВЛ электропередачи, даже при расстоянии нескольких сотен метров от линии может составлять десятые доли ампер на метр. Кабельные линии создают несколько большие напряженности вблизи них, чем воздушные, однако напряженность уменьшается сильнее при удалении от кабеля, и зона заметного поля (напряженность порядка десятых долей ампер на метр) обычно не превышает нескольких десятков метров. Кабели и ВЛ среднего напряжения (6–10 кВ) из-за малого расстояния между фазами создают невысокие напряженности поля, и с их влиянием внутри помещений можно не считаться.

Поле трансформаторов системы электроснабжения изменяется обратно пропорционально расстоянию, и оно может быть заметным на расстоянии менее 10 м. Сети электроснабжения низкого напряжения создают поле, зависящее от несимметрии нагрузки фаз. Его напряженность обратно пропорциональна расстоянию и может быть заметной на расстоянии до 20 м.

В производственных условиях на рабочих местах напряженность магнитного поля промышленной частоты может быть гораздо большей, чем в жилых помещениях. В экстремальных случаях, например вблизи сварочного аппарата, электродуговой печи или непосредственно у проводов мощных ВЛ при выполнении работ под напряжением, персонал может подвергаться воздействию поля напряженностью 1–10 кА/м, что на два порядка и более превышает напряженность поля Земли.

Ориентировочные значения напряженности магнитных полей промышленной частоты, создаваемых различными устройствами, показаны в правой части рис. 11.1. Из этого рисунка видно, что напряженность полей, как правило, лежит много ниже порога восприимчивости (например, ощущение магнитного поля по появлению магнитосфенов в форме мерцаний на периферийных участках поля зрения).

Новым фактором, не свойственным естественной обстановке, является появление высокочастотных электромагнитных полей, создаваемых устройствами связи, телекоммуникаций, радиолокационной техники, микроволновыми аппаратами и т.д. Эти поля частично или полностью экранируются проводящими стенами. Обычно напряженности этих полей, воздействующих на человека, малы по сравнению с рассмотренными. Однако, несмотря на это, влияние высокочастотных полей на человека, создаваемых,

например, устройствами радиотелефонной связи, в настоящее время является предметом исследований и дискуссий.

В жилых помещениях в зависимости от числа, мощности включенных приборов, схемы и исполнения электропроводки напряженность поля может меняться в широких пределах. При современном исполнении сети электропитания, отсутствии токовых петель, связанных с заземленными системами водопровода, отопления и т.д., она обычно не превышает десятых долей ампер на метр, что продемонстрировано на рис. 11.2–11.5.

Изменение индукции  $B$  магнитного поля внутри жилых помещений в течение суток в середине недели (в относительных единицах) приведено на рис. 11.2. Эти данные получены при измерениях индукции в 17 жилых помещениях Западного Берлина. Вертикальными линиями показано среднеквадратическое отклонение. За базовое значение  $B^* = 1$  принято среднее значение индукции для каждого помещения.

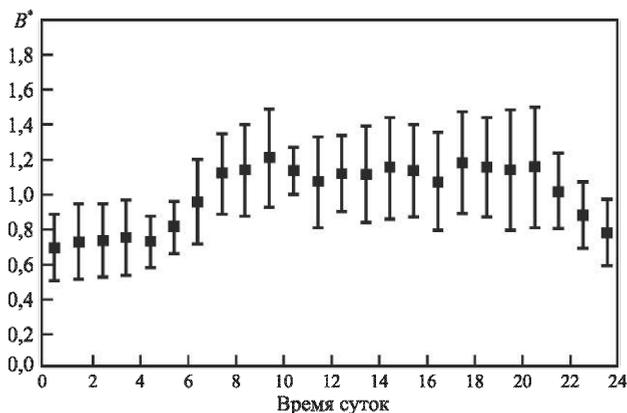


Рис. 11.2. Изменение во времени напряженности магнитного поля  $B^*$  (в относительных единицах) в течение суток

На рис. 11.3 приведен пример изменения индукции  $B$  магнитного поля промышленной частоты при коммутации бытовых электроприборов в жилом помещении. При их включении индукция возрастает от фонового уровня ( $\sim 0,05$  мкТл) до  $\sim 0,3$  мкТл ( $1$  мкТл =  $0,8$  А/м).

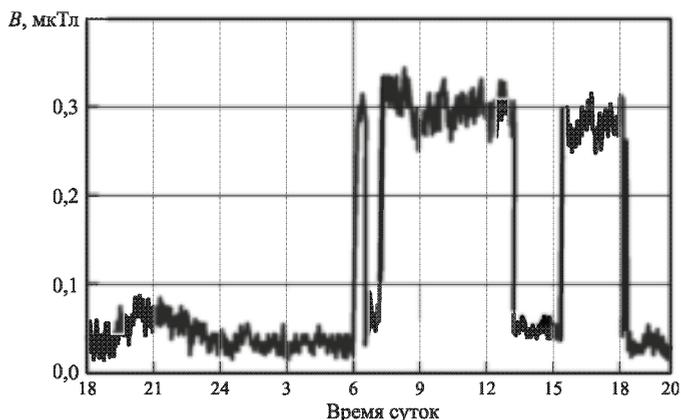
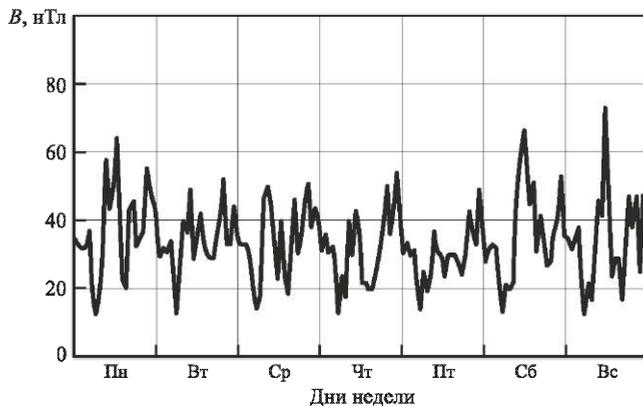


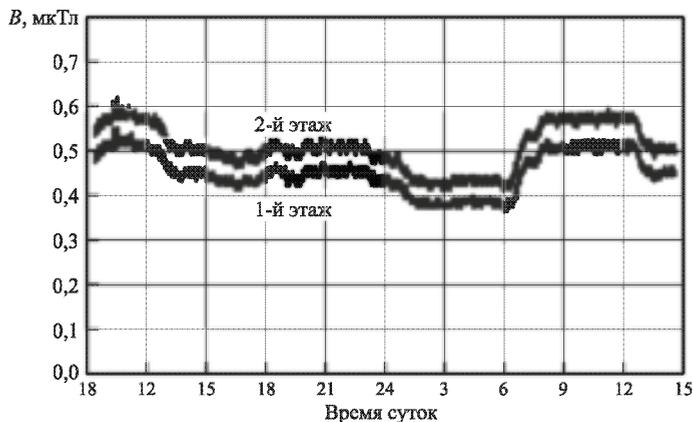
Рис. 11.3. Пример изменения индукции  $B$  в течение суток при включениях электроприборов в жилом помещении

Изменение индукции  $B$  в жилом помещении в течение недели представлено на рис. 11.4. Суточные колебания индукции  $B$  особенно велики в выходные дни, когда включается наибольшее число электробытовых приборов. При минимальном числе включенных приборов индукция составляет  $\sim 15$  нТл, а в воскресенье она возрастает до  $\sim 70$  нТл.



**Рис. 11.4.** Пример изменения напряженности магнитного поля  $B$  в течение недели

На рис. 11.5 показаны изменения в течение 15 часов индукции в жилых помещениях на 1 и 2 этажах дома, в 40 м от которого проходит линия электропередачи 245 кВ. Как видно из рисунка, индукция существенно выше, чем показанная на рис. 11.4, и она изменяется в соответствии с мощностью, передаваемой по линии.



**Рис. 11.5.** Пример изменения напряженностей магнитного поля  $B$  в здании недалеко от линии электропередачи напряжением 245 кВ

Из приведенных данных (рис. 11.1–11.5, табл. 11.2) можно сделать следующий вывод.

Электромагнитная обстановка в жилых помещениях в основном определяется естественным магнитным полем. Напряженность магнитного поля промышленной частоты при включении электроприборов, как правило, не превышает 1 % от напряженности постоянного поля Земли. Напряженность магнитного поля промышленной частоты

имеет тот же порядок, что и переменная составляющая естественного магнитного поля Земли. Исключение составляет лишь использование сравнительно мощных электроприборов, находящихся в непосредственной близости от организма (электроодеяло, утюг, фен, электроинструмент и т.д.).

Сказанное означает, что организм человека практически не испытывает неестественного воздействия, и типичное искажение электромагнитной обстановки в быту не может рассматриваться как электросмог.

Однако на рабочих местах и на объектах электроэнергетики напряженности электрического и магнитного полей могут достигать и даже в десятки раз превышать напряженности полей естественного происхождения. Поэтому рассмотрим возможное влияние таких полей на человека.

### 11.1.3. Механизмы воздействия электрических и магнитных полей на живые организмы

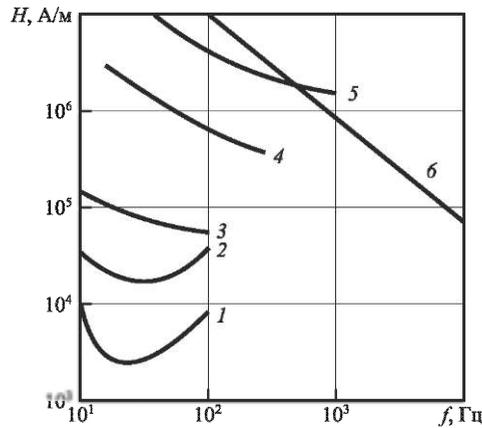
В настоящее время научно установлены два механизма влияния электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека за счет индуцированных в теле токов: изменение разности потенциалов между наружными и внутренними поверхностями мембран клеток (возникновение так называемого потенциала действия); нагрев тканей.

Проявления этих механизмов при воздействии магнитного поля в зависимости от частоты показаны на рис. 11.6. Обстоятельства, связанные с проявлением первого механизма, рассмотрены в п. 11.1.1. Кроме отмеченных там эффектов существуют более слабые эффекты воздействия электрических и магнитных полей на организм, обусловленные изменением потенциала действия, которые имеют место при меньших, чем указанные в п. 11.1.1 (на несколько порядков), напряженностях полей. Одним из таких эффектов является восприимчивость поля человеком не только по косвенным признакам (шевелению волос или ощущениям покалывания при частичных разрядах между кожей и одеждой), но и по подсознательному ощущению наличия поля, а также появлению магнито- или электрофосфенов (ощущению мерцаний на периферийных участках поля зрения) при наличии магнитного или электрического поля определенной напряженности. Восприимчивость полей исключительно индивидуальна. Примерно 5% людей чувствуют наличие электрического поля промышленной частоты, начиная с напряженности 7 кВ/м, а 60% не ощущают поле напряженностью до 20 кВ/м. Усредненные границы восприимчивости электрических и магнитных полей промышленной частоты приведены на рис. 11.1, а граница ощущения наличия магнитного поля в зависимости от частоты дана на рис. 11.6 (кривая 2). Объективно регистрируемые нарушения зрения, недомогание, головные боли наблюдаются при напряженностях около  $10^5$  А/м (рис. 11.6, кривая 3). У некоторых людей магнитофосфены появляются при напряженностях, соответствующих кривой 1.

Как видно из рис. 11.6, кривые 1 и 2 имеют минимум в области промышленных частот. Возрастание кривых с увеличением частоты объясняется инерционностью системы открытия каналов в стенках клеточных мембран, а с уменьшением частоты – снижением индуцированных токов.

Значения напряженности магнитного и электрического полей, воспринимаемых человеком, лежат, как правило, выше встречающихся в быту и на производстве (см. рис. 11.1). Если напряженность электрического поля частотой 50 Гц, воспринимаемая человеком, может встречаться на практике, например, под проводами линий

электропередачи или на территории ОРУ сверхвысокого напряжения, то соответствующая напряженность магнитного поля может быть получена только в специальных условиях.



**Рис. 11.6. Эффекты воздействия магнитного поля разной частоты на человека:**

1 – появление мерцания на периферийных участках поля зрения; 2 – ощущение наличия поля; 3 – объективно регистрируемые нарушения зрения, недомогание, головные боли; 4 – нарушение работы сердца; 5 – нарушения работы нервной системы; 6 – джоулев нагрев тканей при мощности 4 Вт/кг

Вторым, научно установленным механизмом воздействия полей на организм человека, является нагрев тканей при протекании в них емкостных или индуцированных токов. Считается безопасным для организма нагрев тканей на  $1^\circ\text{C}$ , чему соответствует удельная мощность 4 Вт, приходящаяся на 1 кг массы тела. При этой мощности система терморегулирования организма способна обеспечить отвод тепла в окружающее пространство без опасного повышения температуры внутренних органов человека. При частоте 50 Гц напряженность внешнего электрического поля, способная обеспечить тепловую удельную мощность 4 Вт/кг, составляет около 4 МВ/м, т.е. превышает электрическую прочность воздуха. Напряженность магнитного поля, необходимая для выделения указанного тепла в организме, равна  $\sim 50$  МА/м. Таким образом, напряженности электрического или магнитного полей промышленной частоты, способные повысить температуру на безопасное значение, равное примерно  $1^\circ\text{C}$ , на много порядков превышают пороговые значения восприимчивости полей человеком и встречающиеся на практике. Ситуация меняется при высоких частотах, так как индуцированные токи с увеличением частоты возрастают. Количественные данные о зависимости напряженности магнитного поля от частоты, при которой удельная мощность тепла, выделенного внутри организма человека, составляет 4 Вт/кг, приведены на рис. 11.6 (кривая 6).

Таким образом, при промышленной частоте единственным научно установленным механизмом воздействия на организм человека является изменение потенциала действия индуцированными токами.

В настоящее время остается открытым вопрос о возможном влиянии на здоровье человека слабых полей (с гораздо меньшими напряженностями, чем указанные ранее), вплоть до сверхслабых магнитных полей частотой 50 Гц напряженностью примерно  $10^{-1}$  А/м, соизмеримой с напряженностью низкочастотного геомагнитного поля Земли.

Для выявления механизмов влияния и установления фактов влияния ставятся разнообразные медико-биологические эксперименты, проводятся эпидемиологические исследования с целью установления корреляции частоты тех или иных заболеваний людей, длительно подвергающихся воздействию полей промышленной частоты.

Главным недостатком практически всех высказываемых гипотез о возможном влиянии слабых полей на биологические объекты является отсутствие прямых доказательств физических основ того или иного механизма влияния из-за низкого энергетического уровня взаимодействующего с клетками организма поля. Поэтому при рассмотрении механизмов влияния обращается внимание либо на кумулятивный эффект при длительном воздействии поля, локальное увеличение напряженности поля, либо на усиление воздействия за счет различного рода резонансных эффектов. С резонансными явлениями связаны, вероятно, и эффекты в биологических объектах, подвергающихся воздействию высокочастотных полей.

Одним из возможных резонансов мог бы быть циклотронный резонанс – увеличение энергии ионов при их движении в каналах мембран в постоянном магнитном поле Земли при наличии переменного электрического поля, индуктированного внешним источником. Однако количественные оценки показывают, что циклотронный резонанс в тканях живого организма при промышленной частоте невозможен, прежде всего, из-за малой длины свободного пробега ионов и небольших размеров каналов в мембранах.

Индивидуальная восприимчивость полей, ощущение некоторыми индивидуумами слабых высокочастотных полей в определенном диапазоне частот и т.д., отмечаемые в ряде публикаций, вероятно, объясняется структурными особенностями тканей каждого человека, поскольку живая ткань представляет собой очень сложную и разнообразную структуру. Основу этой структуры составляет вода. Известно, что даже чистая вода может иметь до нескольких сотен структурных разновидностей, отличающихся друг от друга компоновкой и связями друг с другом молекул. Также известно, что биологические свойства воды зависят от предыстории: где и как долго находилась вода, подвергалась ли она магнитной обработке и т.д. Ситуация намного усложняется при наличии примесей, растворенных веществ, при нахождении воды в капиллярах, образовании жидкокристаллических структур и т.д. Однако различные состояния молекулярных структур энергетически отличаются друг от друга незначительно, поэтому даже при слабом внешнем воздействии возможны изменения структуры. Причем эти воздействия могут обладать избирательными свойствами: определенные изменения могут происходить при конкретной ориентации структуры относительно силовых линий поля и при определенном значении напряженности. При большей или меньшей напряженности эффект может отсутствовать или носить другой характер.

Многие исследователи указывают на то, что обменные процессы и размножение клеток различных органов человека ускоряются при наличии низкочастотного магнитного поля и этот эффект воспроизводим при напряженности порядка нескольких килоампер на метр и часто невоспроизводим в слабых полях. Эти ускорения относительно невелики, и возможной причиной их возникновения могут быть и иные факторы, например слабые (доли градуса) изменения температуры. Несмотря на это, сокращение жизненного цикла клеток в магнитном поле может быть причиной ракового перерождения клеток, так как остается меньше времени для реализации компенсационных механизмов. Однако нельзя не считаться и с тем, что ускоренное размножение здоровых клеток скажется благоприятно на организме в целом.

Одним из возможных механизмов влияния полей на человека является воздействие поля на выработку жизненно важного гормона – мелатонина. Он вырабатывается в темное время суток и является веществом, подавляющим развитие раковых клеток. На клеточном уровне показано, что добавка мелатонина в физиологический раствор существенно замедляет размножение раковых клеток молочной железы, о чем сообщается в исследованиях, проводимых в лаборатории Л. Беркли. При наложении же магнитного поля частотой 60 Гц напряженностью всего около 1 А/м этот эффект исчезает. Таким образом, механизм влияния магнитных полей на организм человека, и, в частности, повышение риска раковых заболеваний, связывают с двумя обстоятельствами: замедлением выработки мелатонина во время сна и с утратой свойств подавления размножения раковых клеток при наличии магнитного поля.

Первое обстоятельство проверялось экспериментально. Содержание мелатонина в крови специалистов, подвергающихся на рабочих местах воздействию как слабых, так и сильных магнитных полей промышленной частоты, заметно не отличается от содержания в крови контрольных групп. В крови людей, находившихся в магнитном поле напряженностью около 1600 А/м в течение двух ночей, не обнаружено снижения концентрации мелатонина, и даже напротив, наблюдается тенденция увеличения. Таким образом, гипотеза о замедлении выработки мелатонина у человека, находящегося в магнитном поле, не подтверждается.

Второе обстоятельство – ослабление тормозящего действия мелатонина на развитие раковых клеток в организме человека при наличии магнитного поля – прямыми экспериментами проверить невозможно, а делать фундаментальные выводы о влиянии полей на здоровье человека на основе экспериментов с живыми клетками вне организма и даже с подопытными животными не представляется обоснованным.

Из сказанного следует, что, по-видимому, малоперспективным является поиск единого механизма воздействия слабых полей на организм человека, так как таких механизмов может оказаться множество, каждый из которых или несколько одновременно могут иметь место в тех или иных условиях. Ситуацию познания механизмов влияния усложняют разнообразные компенсационные системы такого сложного объекта, как организм человека. Поэтому особое значение приобретают эпидемиологические исследования.

Методика большинства эпидемиологических исследований, как правило, заключается в следующем. На определенной территории выбирается группа людей, имеющих одинаковое заболевание. Группа подбирается по определенному признаку, например, дети одного возраста. Методом случайных чисел подбирается контрольная группа здоровых людей, проживающих в аналогичных условиях.

В каждой группе определяется количество людей, подвергающихся воздействию фактору. При этом степень воздействия градуирована, например, по критериям: слабое, среднее, сильное воздействия. Отношение числа заболевших к числу здоровых при слабом воздействии принимается за базовое, по которому в каждой градации определяется коэффициент корреляции степеней воздействия и риска заболевания.

Основной сложностью эпидемиологических исследований влияния длительно воздействующих полей на здоровье человека является определение степени воздействия. В первых таких исследованиях, проведенных в США, воздействующим фактором считалось наличие воздушных линий электропередачи вблизи жилых домов и не учитывалось то обстоятельство, что линии электропередачи в США обычно проходят вдоль автомагистралей. Затем стали использовать измеренные значения напряженности поля

внутри помещения, например, у входной двери или в спальняй детской комнате, учитывать суточные колебания напряженности и т.д. Однако и при этом оставалась некоторая неопределенность воздействия, связанная с индивидуальным поведением человека в повседневной жизни.

В настоящее время нет достаточных оснований утверждать о негативном влиянии слабых магнитных полей промышленной частоты на здоровье населения, так как одна часть проведенных эпидемиологических исследований подтверждает такое влияние, а другая – отрицает. Так, первые результаты эпидемиологических исследований показали повышенный в 2–3 раза риск заболеваний детей лейкемией при проживании вблизи линий электропередачи, однако последующие исследования в этом направлении поставили под сомнение эти результаты. Причинами этого являются статистическая недостоверность результатов из-за малочисленности групп, а также неопределенность степени воздействия. Так, использование разных критериев степени воздействия (например, наличия вблизи жилого дома линии электропередачи или же измененной в доме напряженности поля) часто дает противоположные результаты. Отличаются результаты и при оценках риска заболеваний разными болезнями. Методические недостатки того или иного исследования, влияние на здоровье множества других факторов, таких как конкретные условия жизни и поведения людей, различия в социальном положении и т.д., объясняют то обстоятельство, что рабочая группа 36.06 СИГРЭ заняла осторожную позицию в вопросе о влиянии магнитного поля промышленной частоты на повышенный риск раковых заболеваний и указала на необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Глубокие и разнообразные исследования влияния магнитных, электрических и электромагнитных полей (в том числе и полей промышленной частоты напряженностями от долей ампер на метр и до десятков килоампер на метр) на биологические объекты (включая эпидемиологические исследования, изучение мутаций в хромосомах и генах, размножение раковых клеток, мембранных потенциалов и токов в клетках сердечной мышцы, реакций нервной системы на воздействия полей, влияние мелатонина и т.д.) на протяжении последних двадцати лет проводит группа исследователей под руководством профессора К. Бринкмана (Германия). Она включает специалистов в области медицины, биологии, химии, физики, электротехники и других направлений. В работе группы принимают участие более 20 лабораторий крупнейших университетов. Из работ этой группы следует, что нет достоверных доказательств опасности слабых магнитных полей промышленной частоты для здоровья человека при напряженности, ограниченной нормами ENV-50166, однако нельзя и утверждать, что проблемы не существуют.

Следует отметить, что отношение научной общественности к опасности для здоровья слабых магнитных полей, к эпидемиологическим исследованиям, повышенному риску раковых заболеваний при воздействии таких полей, меняется. Так, В. Кеммером в журнале «EMC Journal» № 2, 1997 г. приводятся следующие данные о причинах раковых заболеваний в Германии. Примерно 35 % заболеваний связано с продуктами питания; 30 % – с курением; 10 % – с инфекциями; 4 % – с воздействием химических веществ на рабочих местах; 7 % – с сексуальным поведением; 3 % – с употреблением алкоголя; 2 % – с химическими загрязнениями окружающей среды; 1,5 % – с ультрафиолетовым воздействием Солнца; менее 1 % – с пищевыми добавками; 0,5 % – с медикаментами; 4 % – с естественной радиацией; 0,003 % – с радиоактивным облучением на рабочих местах; до 0,001 % – с радиоактивной эмиссией электростанций;

0,01–0,05 % – с влиянием аварии на Чернобыльской электростанции; 0–0,000 % – с электромагнитными полями.

При таких соотношениях становятся бессмысленными эпидемиологические исследования, так как они не могут в принципе дать достоверные результаты.

Таким образом, научно установлены только два возможных механизма: изменение разности потенциалов на мембранах клеток и нагрев. Первый может иметь место при низкочастотных полях высокой напряженности. Второй – при высокочастотных полях большой мощности. Влияние слабых полей на здоровье в настоящее время достоверно не доказано.

## **11.2. Нормирование безопасных для человека напряженностей электрических и магнитных полей**

### **11.2.1. Нормативная база за рубежом и в РФ**

Во многих странах, включая Россию, идет процесс совершенствования нормирования безопасных для здоровья людей напряженностей электрического и магнитного полей, а также потока мощности высокочастотных полей.

Обоснование норм в последние годы становится все более актуальным. При этом все отчетливее проявляются две тенденции: стремление установить более жесткие нормы, закладывая в них большие коэффициенты запаса и возможности проявления пока научно не установленных механизмов влияния на здоровье, например слабых, но длительно действующих полей промышленной частоты, и стремление оценить реальную опасность полей для здоровья человека и на этой базе пересмотреть существующие и обосновать новые нормы по допустимым напряженностям полей и ограничениям пребывания человека в них.

Проявление этих тенденций тесно связано с экономическими аспектами, так как соблюдение санитарных и строительных норм по допустимым напряженностям полей, обеспечение нормированных зон отчуждения для линий электропередачи высокого напряжения и т.д. сопряжено с большими затратами или экономическими потерями.

Следует заметить, что процесс пересмотра норм по воздействию электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека в настоящее время является чрезвычайно динамичным. Нормативные документы за рубежом часто пересматриваются и изменяются, становится иным их правовой статус. Если ранее материалы таких организаций, как CENELEC, IRPA, многих национальных институтов, носили рекомендательный характер и не имели правовой силы, то, например, нормы CEU ENV-50166 по защите персонала на рабочих местах от электромагнитных полей частотой от 0 до 300 Гц, принятые в 1995 г., получили статус правового документа с юридическими последствиями.

В настоящее время в основу нормирования допустимых напряженностей магнитных и электрических полей положены научно установленные механизмы влияния на организм человека: изменение разности потенциалов на мембранах клеток при частотах ниже 10 кГц и нагрев тканей при более высоких частотах. Соответственно базовыми величинами являются безопасная плотность тока в тканях организма в диапазоне частот 4–1000 Гц  $10 \text{ мА/м}^2$ , а при частотах выше 10 кГц – удельная энергия  $4 \text{ Вт/кг}$ . При частоте 50 Гц указанной плотности тока соответствуют напряженности внешних полей  $20 \text{ кВ/м}$  и  $4 \text{ кА/м}$ .

Безопасность полей с указанными напряженностями многократно проверялась экспериментально. Так, в работе И. Ралле, С. Эггерта и К. Хеншела (см. «EMV Kompendium 96», Munchen, 1996) приводятся результаты исследований влияния магнитного поля частотой 50 Гц на здоровье и поведение людей. Воздействию магнитного поля напряженностью до 4 кА/м в течение 10 мин 3 раза в день на протяжении пяти суток подвергалось 20 здоровых молодых людей. Никаких существенных отклонений в ритме сердца, дыхании, температуре тела, электрических токах головного мозга не установлено. Не дали заметных отклонений тесты по современным методикам испытания на восприимчивость поля, внимательность, реакцию на раздражение, психическое состояние и т.д. Однако не исключается влияние поля напряженностью 1,6–4 кА/м при более длительном воздействии и в этой же работе указывается, что должны быть проведены дополнительные эксперименты с целью установления пороговых значений напряженностей и времени воздействия полей, при которых наступает негативное влияние на человека.

При нормировании допустимой напряженности полей и времени их воздействия на рабочих местах и для населения в настоящее время вводят коэффициенты запаса. Так, при тепловом воздействии высокочастотных полей нормы устанавливаются по удельной энергии, в 10 раз меньшей безопасной, т.е. по энергии 0,4 Вт/кг. При низких частотах также устанавливаются коэффициенты запаса от 2,5 до 10 и выше. В нашей стране гигиенические нормы внутри зданий составляют 0,5 кВ/м, напряженность электрического поля на границе отчуждения линий электропередачи не должна превышать 1 кВ/м. Близки к этим значениям и нормы других стран. В США, например, нормированы напряженности электрического поля на границе зоны отчуждения в пределах от 1 кВ/м (штат Монтана) до 3 кВ/м (штат Нью-Джерси). В некоторых странах, например в Австралии, в исключительных случаях для линии 500 кВ допускается напряженность на границе зоны отчуждения 5 кВ/м.

Аналогичная ситуация и с нормированием допустимой напряженности магнитного поля промышленной частоты на рабочих местах и для населения. Рекомендации и нормы различных международных организаций и стран, как правило, не согласованы между собой, а приводимые в них значения напряженностей могут отличаться в несколько раз. В некоторых странах, в том числе и в России, нормы для населения по допустимым напряженностям магнитного поля промышленной частоты отсутствуют.

В настоящее время наиболее обоснованными и полными представляются уже упомянутые временные нормы ENV50166, предложенные Техническим комитетом CENELEC и действующие с 1995 г. Срок действия этих норм определен в три года, по прошествии которых они должны стать основными нормами EN-50166 или должны быть отозваны.

Остановимся кратко на содержании норм ENV50166. За базисное значение напряженности электрического поля при длительном воздействии приняты: постоянное поле – 42 кВ/м, переменное с частотой (0,1–4) Гц – 30 кВ/м (критерий воздействия поля на человека – ощущение поля по косвенным признакам). В диапазоне частот 4–1000 Гц базисным значением считается плотность тока в 10 мА/м<sup>2</sup>, которому соответствуют уже приводимые значения напряженности 20 кВ/м и 4 кА/м. С учетом специфики механизмов изменения разности потенциалов на мембранах клеток при более низких частотах берется базовая плотность тока, обратно пропорциональная, а при более высоких – прямо пропорциональная частоте.

Базисным значением напряженности постоянного магнитного поля принято значение 1,6 МА/м. Впервые нормирован ток, протекающий через человека при контакте

с объектами, находящимися в электрическом поле промышленной частоты: 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения.

Нормы по напряженности полей промышленной частоты на рабочих местах подразделяются на три категории. Первая категория – 6,1 кВ/м и 159 А/м – обязательна информация персонала о поле; вторая – 12,3 кВ/м, 320 А/м и выше – обязательны мероприятия по ограничению пребывания в поле; третья – 19,6 кВ/м и 480 А/м – обязательно, помимо ограничения пребывания в поле, предупреждение: «опасная работа». Для населения базисные значения берутся в 2,5 раза меньшими, чем на рабочих местах.

Следует отметить, что в области низких частот нормы ENV50166 дают более высокие напряженности полей на рабочих местах, чем прежние нормы IRPA. Вероятно, тенденция ослабления ограничений по напряженностям при нормировании может сохраниться и в дальнейшем, если будет доказано, что опасность вредного влияния полей на человека преувеличена.

Следует остановиться на последних отечественных санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах СанПиН 2.2.4.1191–03. В них установлены предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах.

Впервые установлены временные (сроком на 3 года) допустимые уровни ослабления геомагнитного поля в два раза в течение смены.

Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля составляют: при времени воздействия за рабочий день до 10 мин – 24 кА/м; при времени 11–60 мин – 16 кА/м; при времени воздействия 61–480 мин – 8 кА/м. Уровень допустимого локально воздействующего поля повышается примерно в 1,5 раза.

Напряженность электрического поля частотой 50 Гц в течение всей смены может составлять 5 кВ/м. При сокращении времени воздействия допустимая напряженность увеличивается (до 20 кВ/м). При напряженности 20–25 кВ/м допустимое время пребывания человека в поле составляет 10 мин, а при напряженности выше 25 кВ/м пребывание человека без применения средств защиты не допускается.

Предельно допустимые уровни напряженностей магнитного поля промышленной частоты, действующего на все тело человека, следующие: при времени пребывания до 1 ч за смену – 1600 А/м; до 2 ч – 800 А/м; до 4 ч – 400 А/м; до 8 ч – 80 А/м.

При локальном воздействии (на конечности) предельно допустимые напряженности увеличиваются в 4–10 раз в зависимости от времени пребывания в поле. Импульсные поля частоты 50 Гц могут иметь напряженность в зависимости от режима генерации и времени воздействия, от 6000 до 1400 А/м, т.е. в несколько раз большую, чем при непрерывном воздействии.

В СанПиН 2.2.4.1191–03 нормированы допустимые напряженности, потоки мощности, экспозиции высокочастотных электромагнитных полей.

### **11.2.2. Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН**

Исследования показали, что для персонала подстанций и линий СВН, длительно и регулярно находящегося под воздействием электрического поля, допустимые напряженности поля и длительности их воздействия не должны превышать значений, приведенных в табл. 11.3.

При выполнении этих условий обеспечивается самовосстановление физиологического состояния организма в течение суток без остаточных реакций и функциональных или патологических изменений.

Нормативные данные табл. 11.3 действительны, если остальное время рабочего дня человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше 5 кВ/м и исключена возможность воздействия на него электрических разрядов. При этом напряженность определяется на уровне головы человека (1,8 м над уровнем земли).

Следует отметить, что данные табл. 11.3 получены для периодического и длительного пребывания человека в электрическом поле, когда у него через 1–2 месяца выработался динамический стереотип восприятия поля. Одновременно допускаются и большие кратковременные воздействия электрического поля.

При проектировании подстанций СВН определяются маршруты обхода, оперативных переключений при производстве ремонтов и других работ; на моделях или по программе на ЭВМ рассчитывается напряженность электрического поля в этих местах и возможная длительность работ, что сравнивается с данными табл. 11.3.

*Таблица 11.3*

### **Допустимая продолжительность работы персонала в электрическом поле промышленной частоты**

Напряженность электрического поля, кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания персонала в течение суток, мин
5	Без ограничения (в течение рабочего дня)
10	180
15	80
20–25	10

При невыполнении условий табл. 11.3 применяются меры по экранированию рабочих мест: тросовые экраны над дорогами, экранирующие козырьки и навесы над шкафами управления, вертикальные экраны между фазами и др.

Для ОРУ подстанции СВН наряду с расчетами, после ее пуска в эксплуатацию проводят измерения напряженности поля в различных точках, после чего при необходимости экранная защита усиливается. При ремонтных работах применяют съемные экраны. Предъявляются определенные требования к компоновке ОРУ, например не допускается расположение ошиновки над выключателями, чтобы обеспечить возможность их безопасного ремонта и др.

Для линий СВН, вблизи которых возможно нахождение персонала посторонних организаций и местного населения, на основании специально проведенных исследований установлены следующие нормативы по допустимой напряженности под линией без определения допустимой длительности пребывания: 20 кВ/м – для труднодоступной местности (болота, горные склоны и т.п.); 15 кВ/м – для ненаселенной местности; 10 кВ/м – для пересечений с дорогами; 5 кВ/м – для населенной местности.

Кроме того, нормируется допустимая напряженность на границах жилых застроек – 0,5 кВ/м, что допускает пребывание человека в электрическом поле неограниченное время в течение всей жизни.

Если, согласно расчетам, при расстоянии проводов до земли, определяемом перенапряжениями, напряженности под линиями 330 кВ не превышают 8,5 кВ/м, а под линиями 500 кВ–14 кВ/м и не возникают затруднения при их сооружении в ненаселенной местности, то для линий более высокого класса напряжений расстояние до земли в той же местности определяется допустимой напряженностью – 5 кВ/м.

Напряженность поля имеет наибольшее значение под линией и по мере удаления от нее быстро уменьшается. Соответственно зона наибольшего влияния поля из-за провисания проводов находится в середине пролета, а наименьшего – у опор, где высота подвеса проводов наибольшая и, кроме того, сказывается экранирующее действие самих опор. Поэтому дороги, трассы прогона скота, пешеходные дорожки, линии связи и линии более низкого напряжения рекомендуется размещать вблизи опор.

В охранной зоне линии (ее границы параллельны линии и внутри нее напряженность поля превышает 1 кВ/м, для линий 500 кВ – это 25 м, а 750 кВ – 40 м от крайних фаз) не разрешается размещение постоянных и временных жилых и производственных сооружений, регламентируется режим работы ремонтного персонала.

Если при пересечении линией дороги необходимо снизить напряженность, линия экранируется тросовыми экранами, выполненными из одного или двух тросов под каждой фазой, натянутых на железобетонных стойках и заземленных по концам.

Тросовые экраны могут применяться и для снижения напряженности электрического поля на границах жилых застроек (у стен жилых зданий).

Напряженности поля под линией при принимаемых обычно расстояниях проводов до земли для всех линий СВН значительно превышают допустимое для населенной местности значение – 5 кВ/м. Ввиду того, что этот норматив распространяется только на вновь строящиеся линии, в перспективе станет затруднительным вывод таких линий от крупных ТЭС и АЭС, которые расположены в городах или поселках, так как при этом расстояния от проводов линии до земли должны быть не менее 12 м для ЛЭП 330 кВ; 16,5 м для ЛЭП 500 кВ; 22 м для ЛЭП 750 кВ. Учитывая наличие на шинах станций и выводах линий более низких напряжений, в ряде случаев может оказаться экономичным осуществление таких выводов в виде комбинированных линий, у которых под цепью более высокого напряжения расположена цепь более низкого напряжения со сдвигом систем напряжений цепей на 120° за счет изменения фазировки нижней цепи (например, 330/110, 500/220, 750/330). Возможно также использование линий с сильным сближением фаз, экранировка линий и др.

В густонаселенной местности такие решения могут быть приняты и для всей линии электропередачи СВН, так как они не только снижают напряженность поля, но и повышают пропускную способность.

Вторичным фактором, оказывающим существенное влияние на условия работы в охранной зоне, является ток, стекающий с проводящего, но изолированного объекта при прикосновении к нему. Величина этого тока должна быть безопасна для местного населения, причем необходимо учитывать возможность соприкосновения с этими объектами не только мужчин, но также женщин и детей. В этих случаях используются американские данные, согласно которым безопасным для мужчин является ток 9 мА, для женщин – 6,5 мА, для детей – 4,5 мА (как уже отмечалось, EN50166 устанавливает более жесткие нормы – 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения).

Стекающий ток при прикосновении человека определяется напряжением линии, емкостью объекта относительно линии, определяемой объемными параметрами объекта и активным сопротивлением человека. Этот ток эмпирически можно выразить как

$$I_{\text{пр}} = K_{\text{ф}} V E,$$

где  $K_{\text{ф}}$  – коэффициент формы объекта;  $V$  – объем объекта;  $E$  – напряженность поля на уровне 1,8 м над землей.

Таким образом, стекающий ток пропорционален напряженности поля и объему объекта. Например, при напряженности поля 15 кВ/м комбайн СК-4 с прицепом дает стекающий ток 6–6,5 мА, крупные автобусы – 5–6 мА и т.д., т.е. этот ток может быть опасен для женщин и детей.

Вышесказанное регламентирует условия труда и нахождения местного населения в охранной зоне линии 750 кВ и выше, в частности, все сельскохозяйственные машины и механизмы должны быть оборудованы двумя заземляющими цепями с утяжеленными грузами на концах для обеспечения постоянного контакта с землей и сбрасываемыми заглубляемыми заземлителями.

Следует отметить, что эффективным средством ограничения напряженности поля под воздушными линиями электропередачи являются растительные массивы. Выполненные измерения показали, что в зоне сплошных растительных массивов высотой 3–4 м напряженность поля под линиями не отличается от напряженности поля земли ясного дня. В зоне фруктовых садов (яблони, вишни) с расстояниями между деревьями 6–8 м напряженность поля под ВЛ в междурядьях снижается в 2–3 раза по сравнению со случаем прохождения линии в полевых условиях. В кронах деревьев напряженность поля не отличается от напряженности поля земли ясного дня.

### **11.3. Анализ электрических и магнитных полей воздушных линий СВН, проходящих в населенных районах**

Оценка реальных уровней напряженности электрических и магнитных полей вблизи электроэнергетических объектов с учетом сложности электрических соединений и строительных конструкций остается актуальной проблемой.

#### **11.3.1. Напряженность электрического поля от ВЛ 500 кВ**

В целях защиты населения от воздействия электрического поля ВЛ напряжением 330 кВ и выше устанавливают санитарно-защитную зону (санитарный разрыв), т.е. территорию вдоль трассы линии электропередачи, за пределами которой напряженность электрического поля не превышает значение 1 кВ/м. Расчеты показывают, что напряженность электрического поля у земли ( $E_3$ ) достаточно быстро убывает по мере удаления от крайних проводов ВЛ (см., например, рис. 11.7, относящийся к наиболее простой двухцепной ВЛ на опорах типа «Бочка»). На ширину зоны с  $E_3 \geq 1$  кВ/м вдоль трассы ВЛ определенного номинального напряжения влияют конструкция фазных проводов и высота подвески нижней фазы  $H_{\text{мм}}$ , которую, в свою очередь, определяет выполнение условия по максимальной допустимой напряженности для населенной местности непосредственно под проводами ВЛ –  $E_{\text{зм}} \leq 5$  кВ/м.

Двухцепное исполнение линии электропередачи в населенной местности по сравнению с двумя одноцепными ВЛ, проходящими параллельно в одном коридоре, позволяет существенно сократить зону влияния ВЛ и ширину отчуждаемой земли, а для трассы – уменьшить вырубку леса. Так, например, при ширине коридора до 30 м, занимаемого двухцепной ВЛ 500 кВ, для прохождения двух одноцепных ВЛ того же класса номинального напряжения на порталных опорах требуется коридор шириной не менее 80 м. Что касается ширины санитарно-защитной зоны (зоны влияния), то для

двухцепной ВЛ 500 кВ она составляет около 90 м, а для двух одноцепных ВЛ 500 кВ – не менее 140 м.

Если не принимать специальных мер для снижения максимальной напряженности электрического поля у земли под проводами типовых одноцепных ВЛ 500 кВ (с  $H_{\min} = 8$  м), то  $E_{\text{зм}}$  может достигать 12 кВ/м. Эта максимальная величина напряженности для линии реализуется в сравнительно небольшой зоне под проводами в середине пролета в месте наибольшего их провисания, но она явно сильно завышена для населенной местности.

При фиксированном габарите, как показали расчеты, снижение величины  $E_{\text{з}}$  вблизи двухцепной ВЛ достигается при:

- уменьшении числа составляющих проводов в расщепленном проводе (например, на ВЛ 500 кВ с 4-х до 3-х) за счет уменьшения эквивалентного радиуса проводов;
- уменьшении шага расщепления (до 0,3 м) по той же причине;
- изменении порядка чередования фаз на обратный для частичной реализации эффекта компенсации ЭП от геометрически симметричных фаз.

Увеличение высоты опор и, соответственно, более высокая подвеска проводов над землей – наиболее радикальный способ снижения  $E_{\text{з}}$  под ВЛ, что, однако, приводит к увеличению расхода стали и удорожанию линии.

Для населенной местности особенно перспективны ВЛ 500 кВ на двухцепных опорах, которые предложили НИИПТ и СЗИ «Энергосетьпроект» (А.А. Зевин): на промежуточных опорах типа «Бочка» (рис. 11.7) и «Зонт» (рис. 11.8) с фазами  $4 \times \text{АС } 400/93$  и  $3 \times \text{АС } 500/64$ , отвечающими оптимальной в современных условиях плотности тока 0,7–0,8 А/мм<sup>2</sup>. Конструкция опоры «Бочка» обеспечивает преимущество по ширине опоры (расстоянию между проводами крайних фаз), и, соответственно, по ширине занимаемого коридора – 22,4 м, по сравнению с 28 м – шириной опоры «Зонт». Однако при обычной взаимной фазировке левой и правой цепей на опоре (рис. 11.9а) для выполнения условия по максимальной напряженности ЭП у земли  $E_{\text{зм}} \leq 5$  кВ/м габарит проводов нижней фазы до земли в точке наибольшего провисания  $H_{\min}$  должен быть не менее 19 м, что может приводить к общей высоте опоры «Бочка» свыше 50 м. Для опоры типа «Зонт» условие  $E_{\text{зм}} \leq 5$  кВ/м выполняется при заметно меньшем значении  $H_{\min}$  – около 15 м. Зависимость наибольшей величины напряженности ЭП под ВЛ 500 кВ на опорах типа «Зонт» и «Бочка» с фазами  $4 \times \text{АС } 400/93$  и  $3 \times \text{АС } 500/64$  от габарита нижней фазы показана на рис. 11.10. Видно, что применение трех составляющих (с проводом АС 500/64) в расщепленной фазе обеспечивает при фиксированном  $H_{\min}$  несколько меньший уровень напряженности ЭП у земли, чем провода с расщеплением на 4 составляющих (с проводом АС 400/93), что связано с увеличением эквивалентного радиуса проводов в последнем случае.

Дальнейшего снижения электрического поля у земли можно достичь изменением порядка следования фаз одной цепи на обратный, разместив в нижнем ярусе фазы А и С со сдвигом угла фазного напряжения на 240° в зоне расположения фаз ВЛ 500 кВ и АТЭ при  $-19,5 < X < 19,5$  м до значений  $E_{\text{max}} \leq 5$  кВ/м (ПДУ: для населенной местности).

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 для ВЛ 500 кВ границы санитарно-защитной зоны (санитарного разрыва) по обе стороны от линии находятся на расстоянии 30 м от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ВЛ. Тогда для ВЛ 500 кВ на двухцепных опорах «Бочка» и «Зонт» ширина полосы земли (зоны влияния), занятой ВЛ с санитарно-защитной зоной, составляет 83 и 89 м, соответственно.

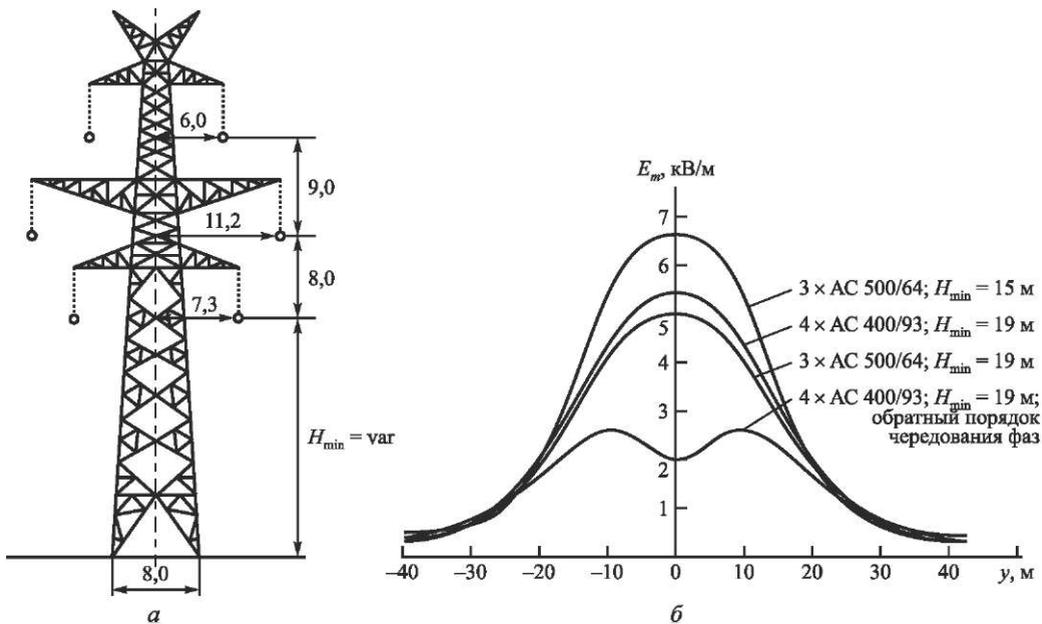


Рис. 11.7. Опора ВЛ 500 кВ типа «Бочка» (а) и распределение максимальной напряженности ЭП вблизи ВЛ (б) на высоте 1,8 м в зависимости от  $H_{\min}$  и конструкции фазы

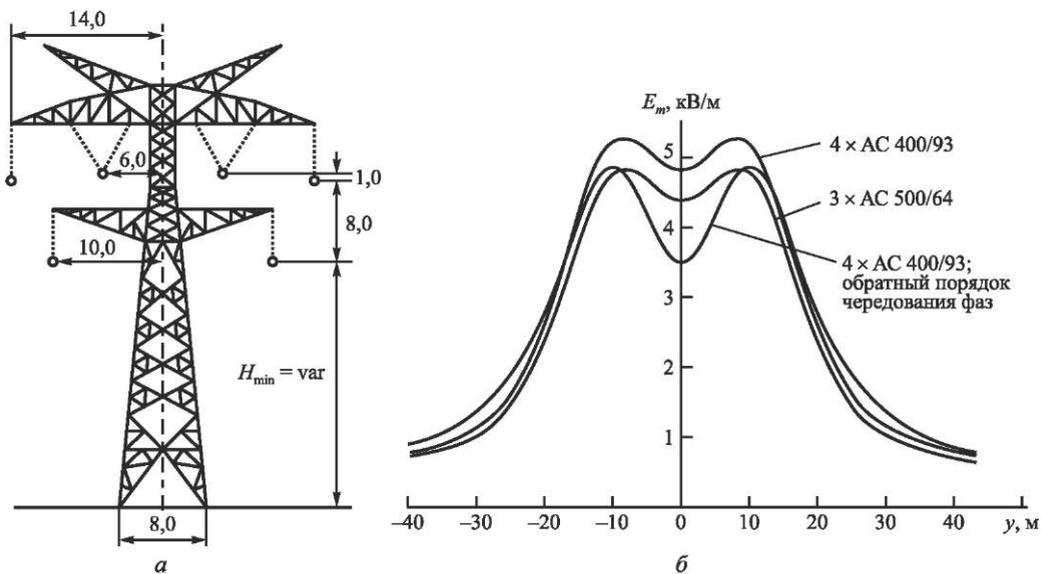


Рис. 11.8. Опора ВЛ 500 кВ типа «Зонт» (а) и распределение максимальной напряженности ЭП вблизи ВЛ (б) на высоте 1,8 м в зависимости от конструкции фазы при  $H_{\min} = 15$  м

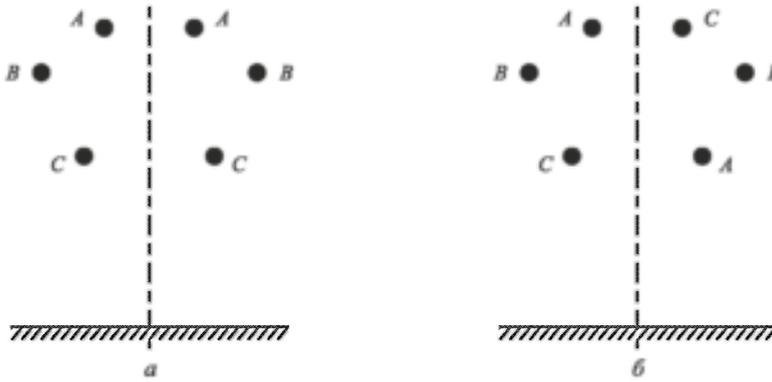


Рис. 11.9. Порядок взаимного следования фаз двухфазной ВЛ:

*a* – прямой (симметрично относительно оси ВЛ);  
*б* – обратный (со сдвигом фазного напряжения на 240°)

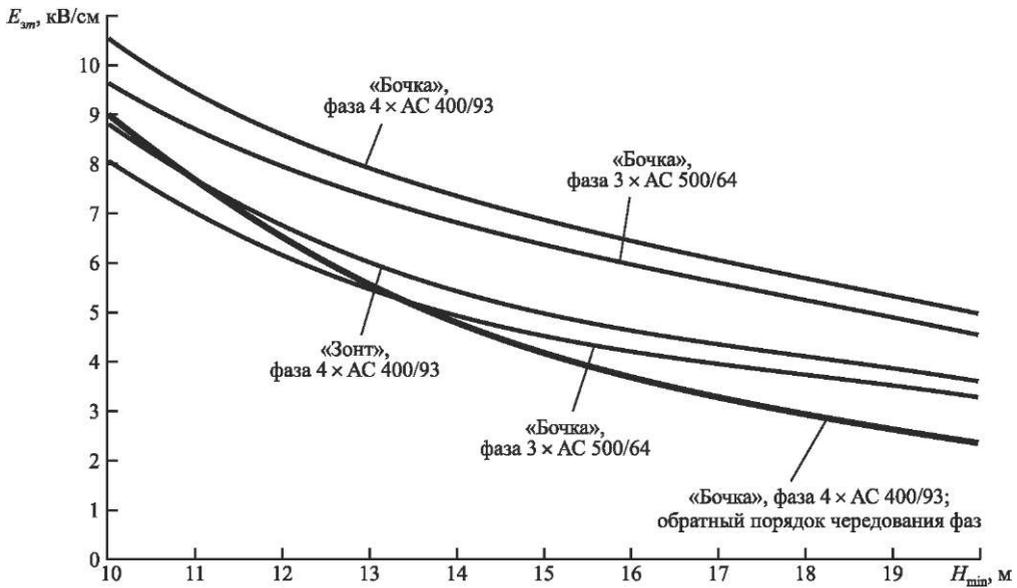
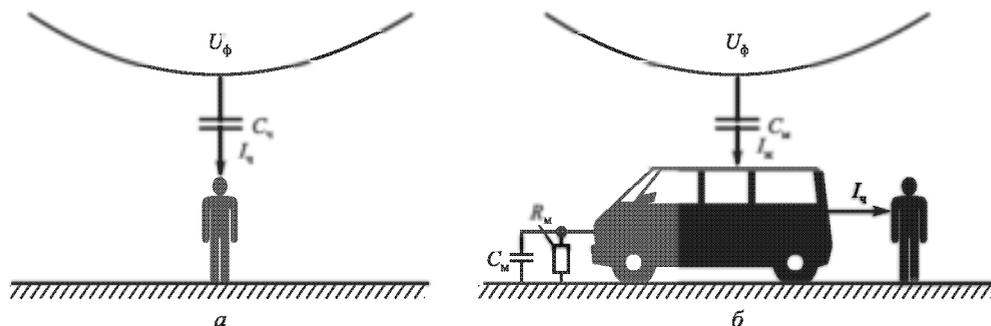


Рис. 11.10. Влияние на величину максимальной напряженности ЭП у земли  $E_{зм}$  расстояния до земли нижней фазы ( $H_{\min}$ ) для ВЛ 500 кВ с опорами типа «Бочка» и «Зонт»

### 11.3.2. Индуцированные ВЛ 500 кВ напряжения и токи

При нахождении человека в электрическом поле ВЛ 500 кВ через него протекает переменный электрический ток. Его значение, как показывают измерения на ВЛ 500 – 750 кВ с  $E_{зм} \approx 15$  кВ/м, не превышает 300 мкА (рис. 11.11*a*), в то время как негативные ощущения у человека начинают наблюдаться при токах около 1 мА. На рис. 11.11*б* показана электрическая схема, иллюстрирующая контакт человека с машиной (трейлером, автокраном, автобусом и т.д.), находящейся под ВЛ переменного тока.



**Рис. 11.11. Протекание тока через человека под проводами ВЛ (а) и при его контакте с машиной (б):**

$I_{\text{ч}}$  – протекающий через человека ток;  $C_{\text{ч}}$  – частичная емкость между проводом ВЛ и человеком;  $C_{\text{м}}$  – частичная емкость между проводом ВЛ и машиной;  $C'_{\text{м}}$  – частичная емкость между машиной и землей;  $R'_{\text{м}}$  – сопротивление тока утечки с машины на землю;  $I_{\text{м}}$  – наведенный ток на машине.

Опасное воздействие на человека под ВЛ при контакте с незаземленной машиной усугубляется тем, что, находясь в ЭП, машина заряжается до напряжения, составляющего несколько киловольт. Величина этого напряжения определяется соотношением частичных емкостей  $C_{\text{м}}$  и  $C'_{\text{м}}$ . В момент, предшествующий прикосновению человека к изолированной машине, между его рукой и машиной проскакивает искра, при этом емкость  $C'_{\text{м}}$  разряжается на человека, в результате чего через него протекает импульс тока с амплитудой в несколько ампер и длительностью в несколько микросекунд. Если движение руки к машине продолжается, то искровые разряды повторяются с частотой до 100 разрядов в 1 с, при этом ощутимый уровень одного разряда уменьшается на порядок по сравнению с ощутимым уровнем при однократном разряде (0,3 Кл при многократных разрядах и 3 мкКл – при однократном). После непосредственного контакта человека с машиной через его тело протекает почти весь установившийся наведенный ток промышленной частоты  $I_{\text{ч}} \approx I_{\text{м}}$ . Длительный ток, протекающий через тело человека при его касании металлических частей машин на резиновом ходу, определяется емкостью между проводами ВЛ и машиной, зависит от размеров машины и при неблагоприятных условиях (крупная машина расположена в зоне наибольшего провисания проводов,  $E_{\text{зм}} \approx 15$  кВ/м, человек хорошо заземлен, например за счет влажной обуви, мокрой почвы) может достигать 10 мА, что соизмеримо с током «отпускания» – 6 мА, и представляет реальную опасность летального исхода для человека. Кроме того, исследования показали, что воздействие на человека предконтактных импульсных токов изменяет результат воздействия на него наведенного тока промышленной частоты, ослабляя сопротивление организма этому току. Поэтому предельно допустимое значение тока, протекающего через человека после воздействия на него предконтактных импульсов тока, должно быть меньше 6 мА. Чтобы гарантировать безопасность человека под ВЛ СВН в документе «Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ Р М-016–2001, РД 153-34.0–03. 150» (ПОТРМ) 2003 г., в гл. 4 «Меры безопасности при выполнении отдельных работ», в п. 4.1 «Работы в зоне влияния электрического и магнитного полей», в п. 4.1.14 отмечено: машины и механизмы на пневматическом ходу, находящиеся в зоне влияния электрического поля, должны быть заземлены. При передвижении в этой зоне для снятия наведенного потенциала следует применять металлическую цепь, присоединенную к шасси или кузову и касающуюся земли.

Во избежание возгорания бензина вблизи ВЛ запрещается устраивать площадки для стоянки всех видов транспорта и размещать предприятия по обслуживанию автомобилей, склады нефти и нефтепродуктов, производить какие-либо операции с горючим, выполнять ремонт автомашин и механизмов. В стесненных городских условиях, а также в зоне окружных автодорог вокруг Москвы и других крупных городов, такие ограничения явно трудновыполнимы; единственный выход из ситуации – снижение напряженности ЭП под ВЛ в этих зонах до ПДУ для населенной местности 5 кВ/м.

### 11.3.3. Вырубка леса и ограничение на использование земель в зоне ВЛ 500 кВ

Вырубка лесов с расчисткой просек и строительство временных дорог при сооружении ВЛ – серьезная экономическая и экологическая проблема. Проектирование ВЛ, проходящей по лесным зонам, должно преследовать две основные задачи: предупреждать аварии, вызванные падением деревьев на провода ВЛ при шквалах ветра, и максимально сокращать ущерб от вырубки просеки в лесных массивах. Для сохранения леса при сооружении ВЛ в ряде стран применяются опоры увеличенной высоты (в том числе, и для прохождения ВЛ над лесом), а также специальные опоры для двухцепных ВЛ, которые обеспечивают радикальное сокращение ширины просеки вырубленного леса. При существующих мировых ценах на древесину, алюминий, сталь, бетон и т.д. стоимость вырубленного леса в расчете на 1 га (т.е. на каждые 1 км просеки шириной 5 м по обеим сторонам от крайних проводов ВЛ) лишь на один порядок меньше стоимости 1 км линии электропередачи 110 кВ. Аналогичная ситуация характерна и для ВЛ 500 кВ. Именно это, наряду с экологической ценностью лесов диктует целесообразность разработки и использования в лесных массивах, особенно с ценной древесиной, специально спроектированных опор: двухцепных, высоких и др.

При прохождении двухцепной ВЛ 500 кВ по лесу для исключения падения деревьев на провода ВЛ при штормовых ветрах вырубка леса в просеке должна производиться в полосе шириной не менее  $(2b + 2h_d)$ , где  $2b$  – расстояние по горизонтали между проводами крайних фаз,  $h_d$  – максимально достигаемая за период роста высота деревьев вблизи ВЛ ( $h_d$  достигает, например, для ольхи 15 м, для ели 30 м, для сосны – 40 м).

Другой важный вопрос сооружения ВЛ связан с сельскохозяйственным производством и касается отчуждения земель. Трасса ВЛ частично или полностью может проходить по землям, находящимся в частном владении. Постоянному изъятию и выкупу подлежат пахотные и другие земли, занятые площадками под опоры и фундаменты под оттяжки (для опор с оттяжками). Границы этих площадок определяются размерами оснований опор плюс 2 м по периметру (порядка 100 м<sup>2</sup>). Фактические размеры необрабатываемых земель несколько больше, так как трактора с навесными орудиями и комбайны не могут круто огибать опоры. Остальные участки земли, входящие в санитарно-защитную зону ВЛ, не изымаются из землепользования, однако при напряженности  $E_{3м} \approx 15$  кВ/м ранее рекомендовалось выращивать на них культуры, не требующие ручного труда. В пределах санитарно-защитной зоны ВЛ запрещается размещать жилые и общественные здания и сооружения.

### 11.3.4. Индукция магнитного поля от ВЛ 500 кВ

По проблеме влияния магнитного поля (МП) промышленной частоты на человека за рубежом проведено около пятидесяти крупномасштабных эпидемиологических исследований, имеется большое количество публикаций. Несмотря на это, пока нет четкого научного обоснования механизма действия электромагнитных полей на человека, хотя биологическая активность МП однозначно медиками признается.

Международное признание биологической активности ЭМП потребовало регламентации условий пребывания в них, вследствие чего Международной комиссией ICNIRP были приняты соответствующие рекомендации. Они основаны на предположении, что интенсивность биологических эффектов при воздействии низкочастотного ЭП или МП определяется плотностью электрического тока, индуцируемого ими в теле человека; при этом безопасное значение плотности наведенного тока при длительном воздействии не должно превышать плотности естественных биотоков в теле человека. Для ЭП промышленной частоты характерно слабое проникновение в тело человека, а для МП организм практически «прозрачен». Концепция первичного действия МП через наведенную плотность тока была принята в большинстве зарубежных стран и послужила исходной точкой для обоснования допустимых уровней воздействия, как для профессионалов, так и для населения. В качестве предельной при кратковременных воздействиях принята плотность наведенного вихревого тока  $10 \text{ мА/м}^2$ , а для населения при длительных воздействиях, руководствуясь практикой гигиенического нормирования (с пятикратным запасом), –  $2 \text{ мА/м}^2$ .

Согласно тому же критерию предельное значение индукции МП при длительном воздействии для населения установлено на уровне  $100 \text{ мкТл}$  (известно, что фоновая индукция геомагнитного МП Земли изменяется от  $30$  до  $70 \text{ мкТл}$ ). До недавнего времени нормы на сооружение ВЛ в населенной местности, действующие во всех странах (включая и российские «ПУЭ» VII издания), каких-либо ограничений на напряженности МП в зоне жилой застройки не устанавливалось. Вблизи ВЛ  $500 \text{ кВ}$ , например, максимальная индукция не превышает  $30 \text{ мкТл}$ . В настоящее время в РФ действуют гигиенические нормативы, устанавливающие дифференцированные предельно допустимые уровни воздействия на население МП  $50 \text{ Гц}$  в зависимости от категории местности: от  $5 \text{ мкТл}$  внутри жилых зданий до  $10 \text{ мкТл}$  на границе санитарно-защитных зон,  $20 \text{ мкТл}$  в зоне прохождения ВЛ и  $100 \text{ мкТл}$  – в ненаселенной и труднодоступной местности (ГН 2.1.8/2.2.4.2262–07 «Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой  $50 \text{ Гц}$  в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях»). Для персонала, производящего работы под ВЛ, Минздравом России приняты «Ориентировочные безопасные уровни воздействия переменных магнитных полей  $50 \text{ Гц}$  при производстве работ под напряжением на ВЛ  $220\text{--}1150 \text{ кВ}$ » (ОБУВ 5060–89), а для персонала, обслуживающего электроустановки (генераторы, токопроводы, силовые трансформаторы), вблизи которых интенсивность МП может значительно возрастать, действуют Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

В последние годы в ряде стран (Швеции, Канаде, США и др.) проведен ряд исследований, направленных на поиск доказательств повышенного риска и онкологических последствий вследствие длительного воздействия МП на население, постоянно проживающее вблизи воздушных линий и подстанций. При этом в качестве безопасных для здоровья уровней МП назывались крайне низкие значения индукции порядка

0,2–1,0 мкТл. Однако достаточно четких результатов и явно выраженной корреляционной связи повышенного риска онкологических заболеваний с продолжительным воздействием МП промышленной частоты ученые не получили, о чем свидетельствуют, например, доклады международных рабочих групп, созданных в 1997 и 1998 гг. правительством США. В настоящее время в США финансирование новых исследований в этом направлении не планируется [4]. Тем не менее, на основании многих исследований в 2002 г. Международное агентство по исследованию рака (МАИР), одна из организаций ВОЗ, отнесло МП промышленной частоты к категории «2b» – потенциальных канцерогенов по рискам развития лейкозов у детей.

Таким образом, и для населенной местности можно найти технические решения для ВЛ 500 кВ, которые обеспечат выполнение всех современных требований для снижения влияния на окружающую среду при условии сохранения необходимой надежности электропередачи и ее технико-экономической эффективности. Но это связано с неизбежным удорожанием ВЛ за счет использования расщепленных проводов  $4 \times AC 400/93$ , существенного увеличения габарита от проводов до земли и конструктивной разработки двухцепных опор.

### 11.3.5. Ограничение напряженности электрического поля ВЛ 500 кВ тросовыми экранами

С целью снижения уровня напряженности ЭП в санитарно-защитной зоне ВЛ могут использоваться пассивные, активные и резонансные тросовые экраны (ПТЭ, АТЭ и РТЭ), авторы Дикой В.П., Токарский А.Ю., Мисриханов М.Ш.

ПТЭ состоит из одного или нескольких заземленных проводов (тросов), расположенных параллельно проводам линии на определенной высоте и расстоянии от оси ВЛ.

АТЭ отличаются от ПТЭ тем, что в цепь заземления тросового экрана включается источник ЭДС с необходимыми значениями модуля и фазного угла.

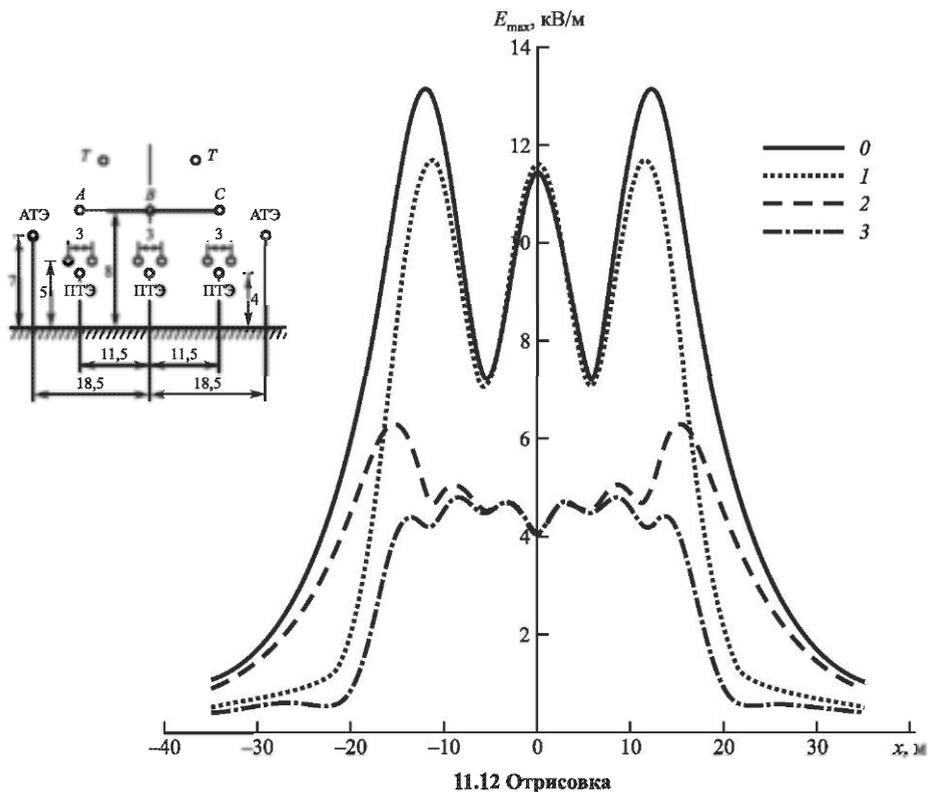
В цепь заземления РТЭ включено индуктивное сопротивление, что позволяет индуцировать на нем напряжение с необходимыми для эффективного экранирования ЭП ВЛ значениями модуля и фазного угла.

Установка АТЭ и РТЭ за проводами крайних фаз ВЛ [5] позволяет сократить ширину зоны воздействия ЭП линии на человека, но при этом практически не влияет на максимумы напряженности  $E_{\max}$  (действующее значение по большей полуоси эллипса поляризации) под фазами ЛЭП.

Конструкция и расположение ТЭ зависят от минимального габарита  $h$  «нижний провод фазы–земля» ВЛ 500 кВ.

Рассмотрим конструкции ТЭ, позволяющие снизить напряженность ЭП ВЛ 500 кВ до значений, меньших ПДУ для населенной местности и зон жилой застройки, для  $h = 8$  м, 10,5 м, 13 м и 15 м.

Наиболее интенсивные уровни напряженности ЭП, создаваемого ВЛ 500 кВ с выбранными значениями  $h$ , создаются при габарите «нижний провод фазы–земля», равном 8 м. В этом случае (рис. 11.12) под каждой фазой устанавливаются системы пассивных ТЭ, состоящие из трех проводов, один из которых расположен под центром своей фазы на высоте 4 м, а два других – на высоте 5 м, но сдвинутые от центра фазы на  $\pm 1,5$  м по оси  $Ox$ .



**Рис. 11.12.** Расположение АТЭ и систем ПТЭ относительно фаз ВЛ-500 кВ с габаритом 8 м и распределение  $E_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении линии при отсутствии экранов (0) при наличии двух АТЭ (1) при наличии систем ПТЭ (2); при наличии двух АТЭ и систем ПТЭ (3)

По бокам ВЛ на высоте 7 м и на расстоянии  $\pm 18,5$  м от ее оси расположим АТЭ (или РТЭ) с напряжением  $63,5e^{-j180}$  кВ со стороны фазы А и  $63,5e^{-j60}$  кВ со стороны фазы С.

Поскольку ТЭ могут рассматриваться как части ВЛ, то расположение ПТЭ под ВЛ 500 кВ выбрано по наименьшему допустимому изоляционному расстоянию по воздуху от токоведущих до заземленных частей ВЛ по условию воздействия грозových перенапряжений, которое согласно ПУЭ составляет 3,20 м.

Согласно ПУЭ, наименьшее расстояние между фазами ВЛ 500 кВ по условию надежной работы при воздействии внутренних перенапряжений ограничено 4,20 м. АТЭ расположены от крайних фаз на расстоянии 7,07 м и напряжение между крайней фазой линии и ближайшим АТЭ составляет 352,2 кВ, что значительно меньше 500 кВ.

АТЭ обеспечивают снижение  $E_{\max}$  вне зоны расположения фаз ВЛ и самих АТЭ (рис. 11.12, кривая 1) до значений  $\leq 2$  кВ/м.

Система ПТЭ ограничивает напряженность ЭП в зоне расположения фаз линии (рис. 11.12, кривая 2) до значений  $E_{\max} \leq 5-5,5$  кВ/м.

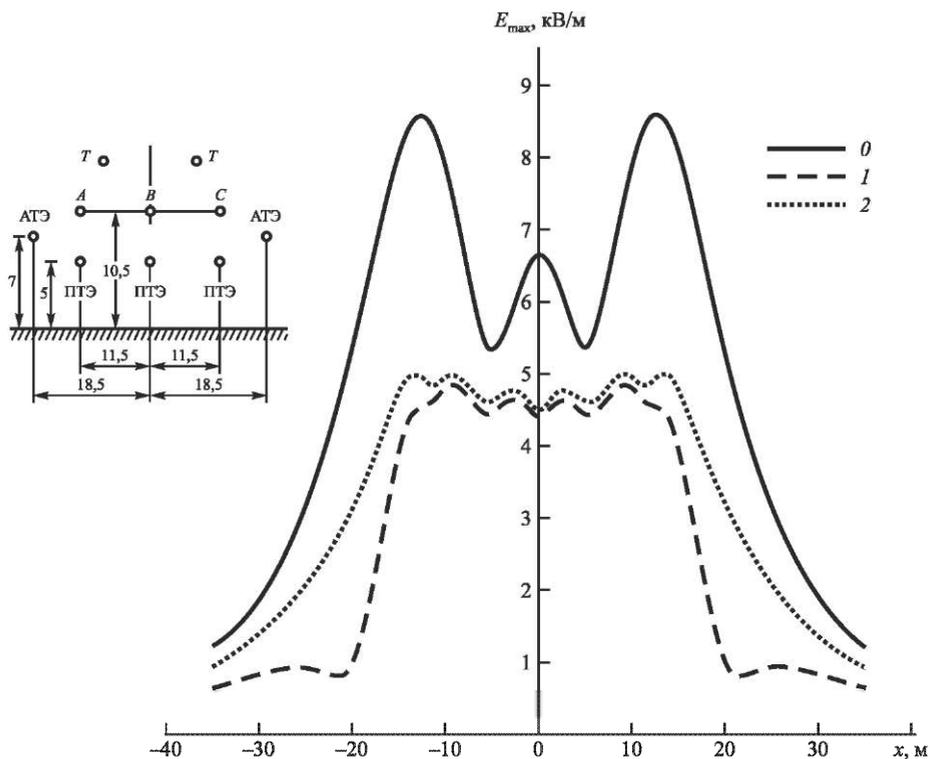
Совместная работа АТЭ и системы ПТЭ приводит к снижению напряженности ЭП вне зоны расположения фаз ВЛ 500 кВ и АТЭ:

- в зоне  $-18,5 > X > 18,5$  м, до значений  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м (ПДУ для территории зоны жилой застройки);

– в зоне расположения фаз ВЛ 500 кВ и АТЭ при  $-19,5 < X < 19,5$  м до значений  $E_{\max} \leq 5$  кВ/м (ПДУ для населенной местности).

Таким образом, для ВЛ 500 кВ даже при минимальном габарите «нижний провод фазы–земля», равном 8 м, применение двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ, а также трех систем ПТЭ делает ее пригодной для нахождения в населенной местности с зонами жилой застройки.

При минимальном габарите «нижний провод фазы–земля», равном 10,5 м, конструкция ПТЭ значительно упрощается. В этом случае каждый ПТЭ может иметь один провод и размещаться под центром своей фазы на высоте 5 м (рис. 11.13). Расположение обоих АТЭ остается прежним – на высоте 7 м от поверхности земли и со смещением на  $\pm 18,5$  м от оси линии.



**Рис. 11.13.** Схема расположения АТЭ и ПТЭ для ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы–земля» 10,5 м и распределение  $E_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли при отсутствии экранов (0); при трех ПТЭ и двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ (1); при двух ПТЭ и двух АТЭ с напряжением  $63,5e^{-j120^\circ}$  кВ (2)

На рис. 11.13 показано распределение  $E_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ 500 кВ: неэкранированной линии – кривая 0, ВЛ экранированной с помощью трех ПТЭ и двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ – кривая 1.

В рассматриваемом случае экранирования ВЛ 500 кВ, применение трех ПТЭ и двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ, напряженность ЭП в зоне, удаленной на расстояние  $X = \pm 19,5$  м от оси линии, снижается до значений  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м, а в зоне расположения фаз ВЛ 500 кВ и АТЭ при  $-19,5 < X < 19,5$  м до значений  $E_{\max} \leq 5$  кВ/м.

При наличии вблизи зоны прохождения ВЛ СВН, интенсивность ЭП которой необходимо снизить, трехфазного источника с линейным напряжением 110 кВ, последний можно использовать в качестве источника ЭДС при экранировании. Если разместить АТЭ на расстоянии от оси линии  $X = \pm 17$  м, а ПТЭ под крайними фазами переместить на  $X = \pm 11,3$  м, то при подаче на каждый активный экран напряжения  $63,5e^{-j120^\circ}$  кВ (рис. 11.13, кривая 2) зона со значением напряженности  $E_{\max} \leq 5$  кВ/м расширится до границ  $X = \pm 33$  м от оси линии, а зона, где  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м будет находиться в области значений  $-33 > X > 33$  м. Несмотря на увеличение границ рассматриваемых зон, эффект экранирования сохраняется.

Для ВЛ 500 кВ с габаритом «нижний провод фазы–земля» 13 м напряженность ЭП под средней фазой у неэкранированной линии меньше 5 кВ/м (рис. 11.14), поэтому установка ПТЭ по оси линии не имеет смысла. В этом случае для экранирования ЭП следует применять два ПТЭ, расположенные на расстоянии  $X = \pm 12$  м от оси линии и на высоте  $Y = 6$  м над землей в сочетании с двумя АТЭ с координатами расположения  $X = \pm 20,5$  м и  $Y = 7$  м.

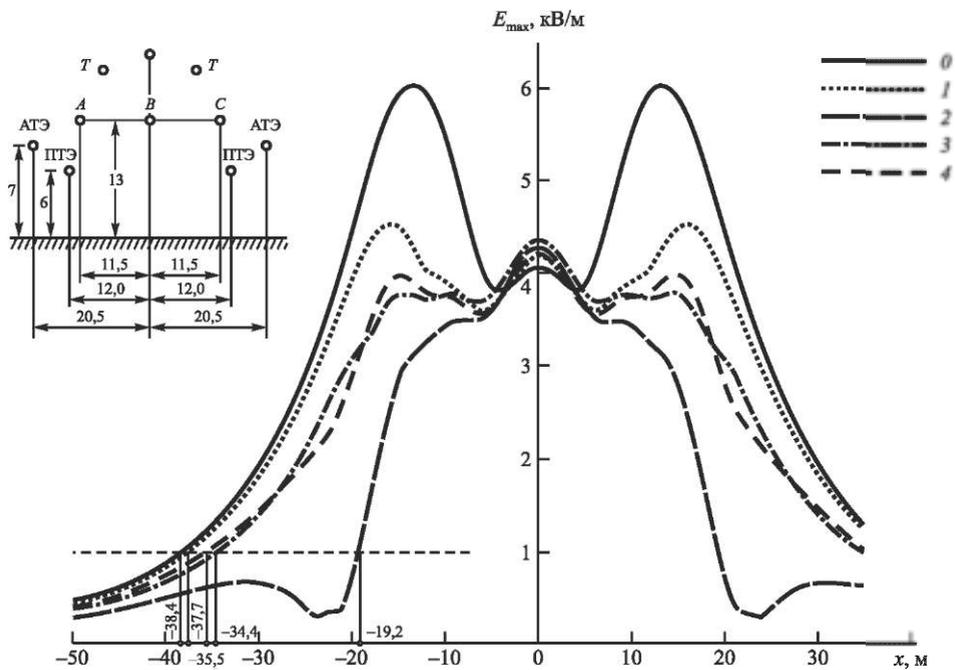


Рис. 11.14. Расположение АТЭ и ПТЭ относительно фаз ВЛ-500 кВ с минимальным габаритом 13 м и распределение  $E_{\max}$  на уровне 1,8 м в сечении линии при отсутствии экранов (0); при двух ПТЭ (1); при двух ПТЭ и двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ (2); при двух ПТЭ и двух АТЭ с напряжением  $63,5e^{-j120^\circ}$  кВ (3); при двух ПТЭ и двух заземленных АТЭ (4)

Использование двух ПТЭ на ВЛ 500 кВ с габаритом 13 м приводит к снижению напряженности ЭП на уровне 1,8 м от поверхности земли до значений меньших 5 кВ/м

под всей линией (кривая 1). Однако зона с  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м начинается при  $X = \pm 37,7$  м от оси линии.

Применение двух АТЭ с напряжением  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ приводит к сужению зоны с  $E_{\max} > 1$  кВ/м на 8,5 м до  $X = \pm 19,2$  м без увеличения напряженности ЭП более 5 кВ/м под фазами линии (кривая 2).

При подаче на АТЭ напряжения  $63,5e^{-j120^\circ}$  кВ (кривая 3) или 0 кВ (кривая 4)  $E_{\max}$  под фазами ВЛ остается меньше 5 кВ/м, но зоны с  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м для этих вариантов экранирования начинаются при  $X = \pm 34,4$  м и  $X = \pm 35,5$  м, соответственно.

Как уже отмечалось, для минимального габарита проводов фаз ВЛ 500 кВ, равного 15 м,  $E_{\max}$  под фазами ВЛ не превышает 5 кВ/м, но зона жилой застройки с  $E_{\max} \leq 1$  кВ/м при этом должна находиться на расстоянии  $X = \pm 39,2$  м от оси линии.

Для сужения зоны с  $E_{\max} > 1$  кВ/м необходимо установить (рис. 11.15) два АТЭ на расстоянии  $\pm 20,5$  м от оси линии на высоте 7 м над поверхностью земли. В первом случае экранирования (кривая 1) зона с  $E_{\max} > 1$  кВ/м, по сравнению с не экранированной ВЛ, сокращается на 20 м: от  $X = \pm 39,2$  м до  $X = \pm 19,2$  м. Во втором и третьем случаях (кривые 2 и 3) зона сокращается незначительно: до  $X = \pm 36,3$  м и  $X = \pm 37,3$  м, соответственно.

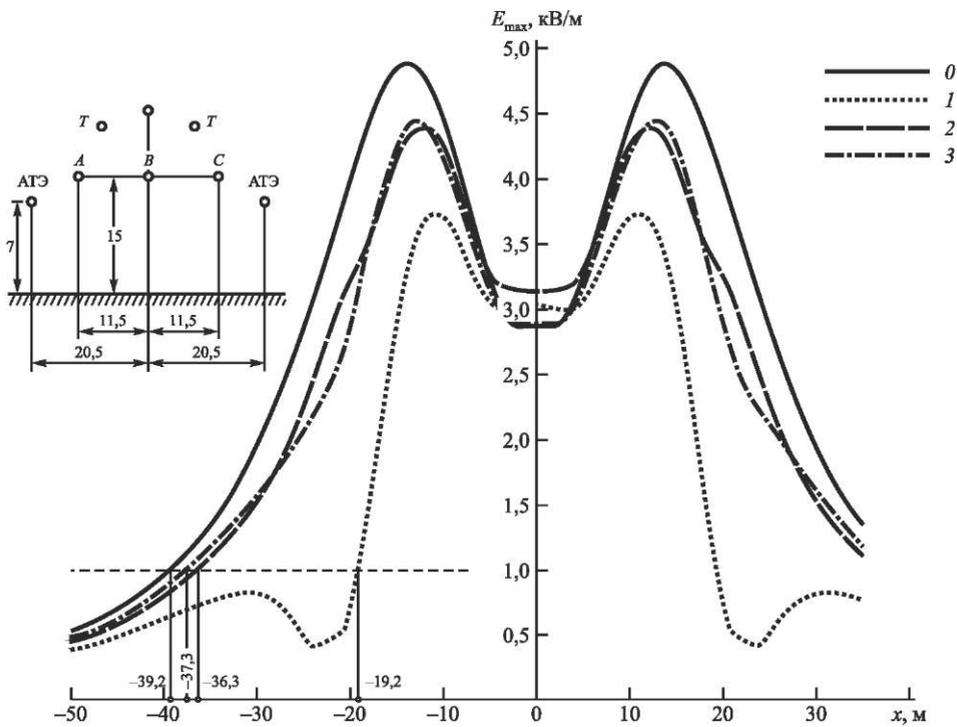


Рис. 11.15. Расположение проводов АТЭ относительно фаз ВЛ-500 кВ с габаритом проводов фаз 15 м и распределение  $E_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении рассматриваемой линии при отсутствии экранов (0); при двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180^\circ}$  и  $63,5e^{-j60^\circ}$  кВ (1); при двух АТЭ напряжением  $63,5e^{-j120^\circ}$  кВ (2); при двух заземленных АТЭ (3)

### 11.3.6. Ограничение напряженности магнитного поля ВЛ 500 кВ контурными экранами

Согласно ГН 2.1.8/2.2.4.2262–07 «Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых-, общественных зданий и на селитебных территориях» в РФ действуют гигиенические нормативы, устанавливающие дифференцированные предельно допустимые уровни воздействия на население МП 50 Гц в зависимости от категории местности: от 5 мкТл (4 А/м) внутри жилых зданий до 10 мкТл (8 А/м) на границе санитарно-защитных зон, 20 мкТл (16 А/м) в зоне прохождения ВЛ и 100 мкТл (80 А/м) – в ненаселенной и труднодоступной местности.

ЭП и МП трехфазной линии носят эллиптический характер поляризации, но у МП он более ярко выражен [8, 9].

На рис. 11.16 показано распределение на уровне 1,8 м от поверхности земли в поперечном сечении ВЛ 500 кВ с габаритом «нижний провод фазы–земля» 8 м для:

- $H_{\max}$ ,  $H_{\min}$  – действующих значений напряженности МП по большей и меньшей полуосям эллипса;
- $K_э^{МП} = H_{\min}/H_{\max}$  – коэффициента эллипсности;
- $\alpha$  – угла наклона большей полуоси эллипса к оси  $Ox$ .

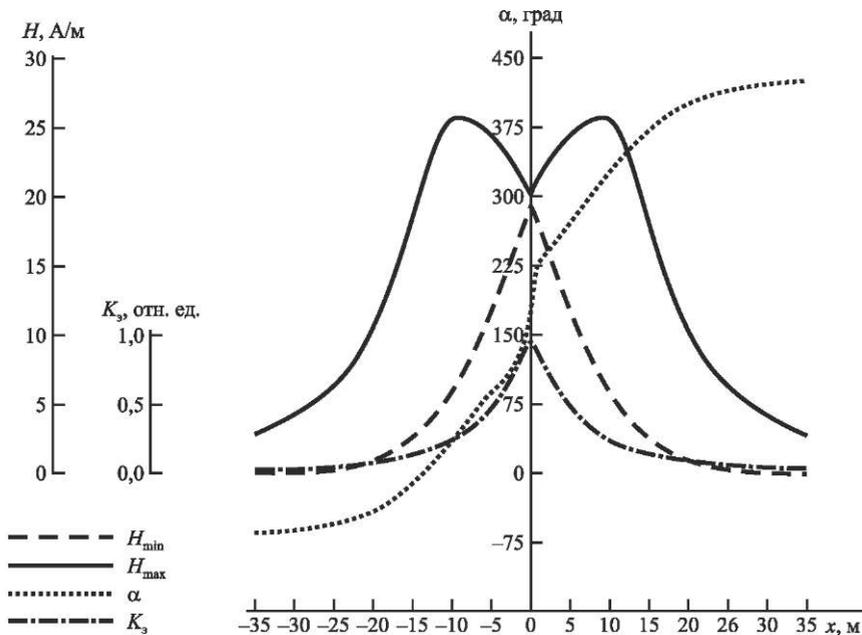


Рис. 11.16. Распределение  $H_{\max}$ ,  $H_{\min}$ ,  $K_э$  и  $\alpha$  в поперечном сечении ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли при габарите «нижний провод фазы–земля» 8 м и максимальном значении модуля фазного тока 1050 А

Если максимальное значение коэффициента эллипсности напряженности ЭП составляет  $K_э^{ЭП} = E_{\min}/E_{\max} = 0,54$  при  $X = \pm 6$  м, то для МП коэффициент  $K_э^{МП} = 0,96$  при  $X = 0$  м.

Для прямолинейного провода с током большая полуось эллипса напряженности МП при изменении координаты  $X$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  поворачивается на угол  $\alpha = 180^\circ$ : от  $+90^\circ$

до  $-90^\circ$ , для одноцепной трехфазной ВЛ этот поворот составляет  $540^\circ$ : от  $-90^\circ$  до  $450^\circ$  (см. рис. 11.16).

Полный вектор  $\mathbf{H}$  напряженности МП ВЛ в произвольной точке пространства можно разложить на составляющие  $\mathbf{H}_X$  и  $\mathbf{H}_Y$  по осям координат  $X$  и  $Y$ , а также на составляющие  $\mathbf{H}_{\max}$  и  $\mathbf{H}_{\min}$  по большей и меньшей полуосям эллипса.

Экранирование МП ВЛ СВН осуществляется с помощью контурных экранов (КЭ). По способу установки КЭ могут быть:

- вертикальные КЭ (ВКЭ) [8] экранирующие только горизонтальную составляющую  $\mathbf{H}_X$  полного вектора  $\mathbf{H}$  МП;
- направленные КЭ (НКЭ).

НКЭ должен быть направлен таким образом, чтобы в зоне экранирования его ось была параллельна составляющей  $\mathbf{H}_{\max}$  полного вектора  $\mathbf{H}$ .

По конструкции КЭ могут быть [10] пассивными ПКЭ (контур экрана замкнут накоротко), активными АКЭ (в цепь экрана включена определенная электродвижущая сила – ЭДС) и резонансными РКЭ (в цепь экрана включена емкость с целью снижения его индуктивного сопротивления).

Работа КЭ заключается в следующем:

- в контуре ПКЭ магнитным полем ВЛ наводятся токи, которые создают свое МП, компенсирующее поле линии;
- в контуре АКЭ для усиления экранирующего эффекта величина наведенного в нем тока корректируется по модулю и фазному углу с помощью включенной ЭДС;
- в контуре РКЭ включенная в цепь емкость уменьшает индуктивное сопротивление контура, увеличивая наведенный ток и экранирующий эффект.

Наиболее эффективными по степени экранирования и ширине экранирующей зоны являются направленные контурные экраны.

ВКЭ менее эффективны, так как имеют узкую зону экранирования, и в случае необходимости устанавливаются в зонах труднодоступных для НКЭ.

На рис. 11.17 показаны: схема расположения расчетных уровней  $Y$  (рис. 11.17а) под проводами фаз ВЛ 500 кВ, когда ось  $OX$  совпадает с центрами фаз; распределение по расчетным уровням угла  $\alpha$  наклона большей полуоси эллипса напряженности МП (рис. 11.17б); распределение по расчетным уровням напряженности  $H_{\max}$  (рис. 11.17в) для МП, создаваемого ВЛ 500 кВ.

Для уровней  $Y = -5,5$  и  $-6,5$  м при  $X = 0$  м  $H_x > H_y$  и угол  $\alpha = 0$  или  $180^\circ$ , для остальных расчетных уровней  $H_x < H_y$  и при  $X = 0$  м  $\alpha = 90^\circ$ . Для  $13 \text{ м} < X < 17 \text{ м}$  угол  $\alpha$  повернут на  $180^\circ$  с целью уменьшения размера рисунка.

Для всех расчетных уровней в области  $X \approx -9$  м угол наклона большей полуоси эллипса  $\alpha \approx 45^\circ$ , а в области  $X \approx 9$  м  $\alpha \approx 135^\circ$ . В этих областях напряженности  $H_{\max}$  имеют максимальные значения. Поэтому НКЭ направляются в эти области таким образом, чтобы углы наклона осей НКЭ к оси  $Ox$  были равны углам  $\alpha$ .

Поскольку ось КЭ перпендикулярна плоскости КЭ, то угол  $\Theta$  наклона плоскости НКЭ (рассматривается НКЭ<sub>1</sub> с левой стороны от оси ВЛ на рис. 11.18) к оси  $Ox$  определяется по выражению:

$$\Theta = 90^\circ - \alpha.$$

Применение контурных экранов позволяет снизить напряженность МП под ВЛ 500 кВ до значений меньших 16 А/м (рис. 11.19).

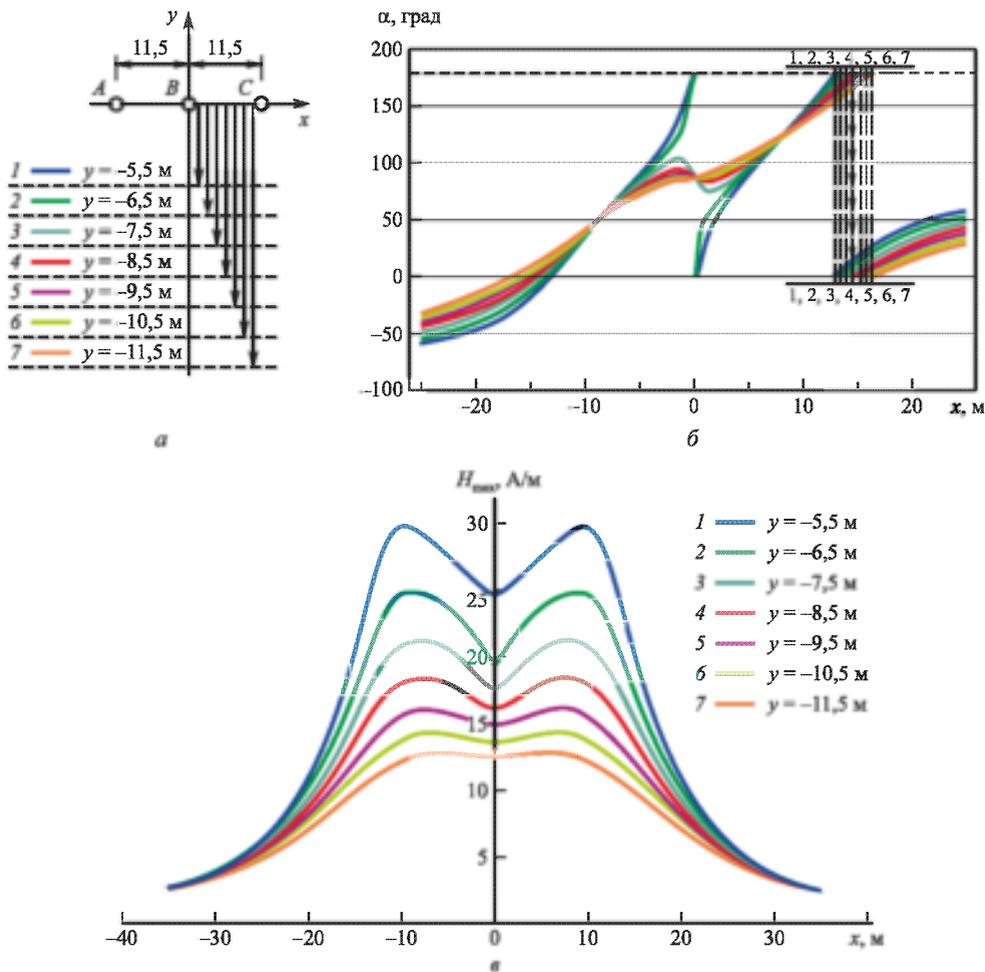


Рис. 11.17. Схема расположения расчетных уровней под проводами фаз ВЛ-500 кВ (а), распределение по расчетным уровням угла  $\alpha$  наклона большей полуоси эллипса напряженности МП (б) и распределение по расчетным уровням напряженности  $H_{\max}$  МП, создаваемого ВЛ-500 кВ (в)

При использовании пассивных КЭ картина распределения напряженности  $H_{\max}$  несимметрична. Это вызвано тем, что, несмотря на симметричные значения ЭДС, наведенных в НКЭ<sub>1</sub> и НКЭ<sub>2</sub> протяженностью 1000 м и равных:

$$E_1 = 72e^{-j106^\circ} \text{ В}; \quad E_2 = 72e^{-j46^\circ} \text{ В},$$

в результате наличия активных составляющих сопротивлений НКЭ<sub>1</sub> и НКЭ<sub>2</sub>, токи, протекающие в них несимметричны:

$$I_{K_1} = 103,3e^{-j166,1^\circ} \text{ А}; \quad I_{K_2} = 101,6e^{-j30,7^\circ} \text{ А},$$

что приводит к несимметричному распределению функции  $H_{\max}(x)$  относительно оси линии.

Активные КЭ содержат в цепях контуров НКЭ<sub>1</sub> и НКЭ<sub>2</sub> дополнительные ЭДС, имеющие значения:

$$E'_1 = 51,6e^{-j77^\circ} \text{ В}; \quad E'_2 = 40,0e^{-j36^\circ} \text{ В},$$

что позволяет добиться симметричных значений токов в них:

$$I_{K_1} = 110e^{-j172^\circ} \text{ A}; \quad I_{K_2} = 110e^{-j52^\circ} \text{ A}$$

и симметричного распределения  $H_{\max}(x)$  относительно оси ВЛ.

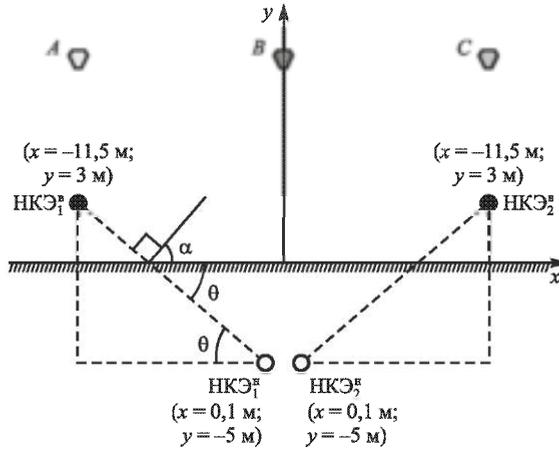


Рис. 11.18. К определению угла  $\theta$  наклона плоскости НКЭ к оси  $Ox$

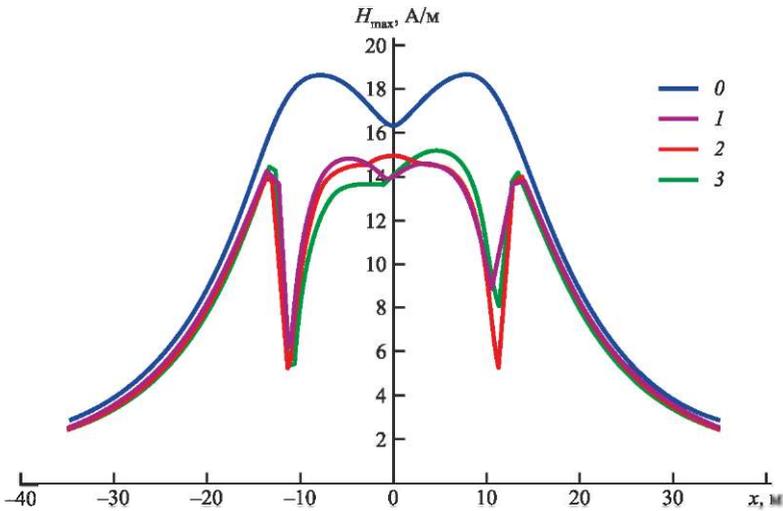


Рис. 11.19. Распределение  $H_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом 10 м при фазном токе 1050 А:

без экранов – кривая 0 и с применением пассивных НКЭ – кривая 1, активных НКЭ – кривая 2 и резонансных НКЭ – кривая 3

В цепи контуров резонансных контурных экранов включены емкости по 17000 МкФ каждая. Это позволяет уменьшить индуктивные составляющие сопротивлений их цепей и увеличить модули токов. При этом комплексные величины токов в резонансных НКЭ<sub>1</sub> и НКЭ<sub>2</sub> оказываются несимметричными:

$$I_{K_1} = 141e^{-j168^\circ} \text{ A}; \quad I_{K_2} = 138e^{-j27^\circ} \text{ A},$$

также несимметричный вид имеет распределение напряженности  $H_{\max}(x)$ .

Напряженность МП, как и напряженность ЭП, создаваемого ВЛ, уменьшается с увеличением габарита «провод–земля» рис. 11.20.

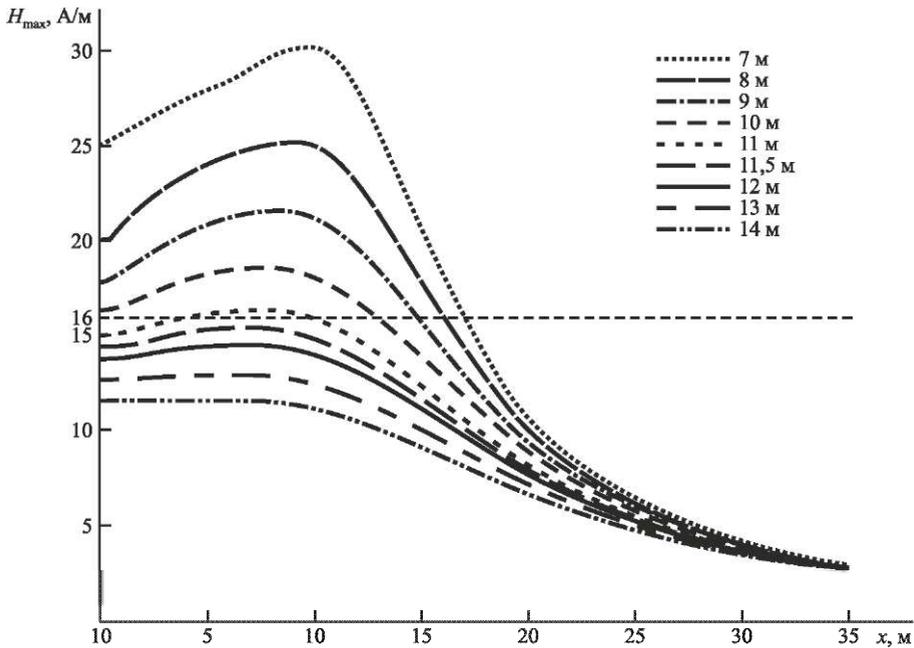


Рис. 11.20. Распределение  $H_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ для различных габаритов «нижний провод фазы–земля»  $I_{\phi} = 1050 \text{ А}$

При  $h \geq 11,5 \text{ м}$  достигается условие  $H_{\max} \leq 16 \text{ А/м}$  и ограничение напряженности МП для этой ВЛ при габаритах больших или равных 11,5 м не требуется.

### 11.3.7. Параллельное использование тросовых и контурных экранов

Контурные экраны имеют потенциал относительно земли практически равный нулю, так как падение напряжения, создаваемого током  $I_K$  в КЭ на его сопротивлении  $Z_{КЭ}$ , составляет 10–100 В в зависимости от величин  $I_K$  и  $Z_{КЭ}$ . По этой причине верхние провода контурных экранов, установленные в зоне фаз ВЛ, одновременно могут играть роль пассивных тросовых экранов (рис. 11.21).

Верхние провода двух НКЭ имеют координаты  $X = \pm 12 \text{ м}$ ,  $Y = 3 \text{ м}$ , нижние –  $X = \pm 0,1 \text{ м}$ ,  $Y = -5 \text{ м}$ . Координаты двух АТЭ:  $X = \pm 18,5 \text{ м}$ ,  $Y = 7 \text{ м}$ . Два крайних ПТЭ устанавливаются с  $X = \pm 10 \text{ м}$ ,  $Y = 3 \text{ м}$ , а ПТЭ под средней фазой состоит из двух проводов с координатами  $X = \pm 1 \text{ м}$ ,  $Y = 3 \text{ м}$ .

Для ВЛ 500 кВ принятое расположение экранов (см. рис. 11.21) позволяют снизить напряженность МП под всей линией до значения  $H_{\max} \leq 16 \text{ А/м}$ , а напряженность ЭП в зоне расположения фаз до значения  $E_{\max} \leq 5 \text{ кВ/м}$  и в зоне  $-19 \geq X \geq +19 \text{ м}$  до значений  $E_{\max} \leq 1 \text{ кВ/м}$ .

Поскольку в общем случае земля не влияет на распределение магнитного поля то максимальное значение напряженности  $H_{\max}$  МП приходится на уровень центра фаз

с координатой  $Y \approx 10,2$  м и составляет для неэкранированной линии 2,10 А/м (кривая  $H_0$  на рис. 11.22).

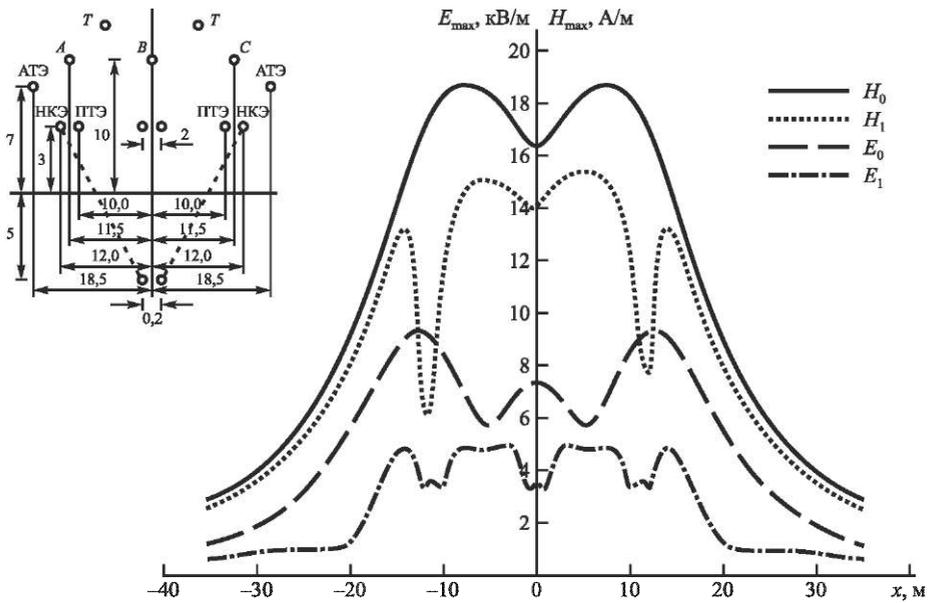


Рис. 11.21. Расположение АТЭ, ПТЭ и НКЭ и распределение  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом 10 м при отсутствии экранов ( $E_0$  и  $H_0$ ); при двух АТЭ, трех ПТЭ и двух верхних проводников НКЭ ( $E_1$ ); двух пассивных НКЭ ( $H_1$ )

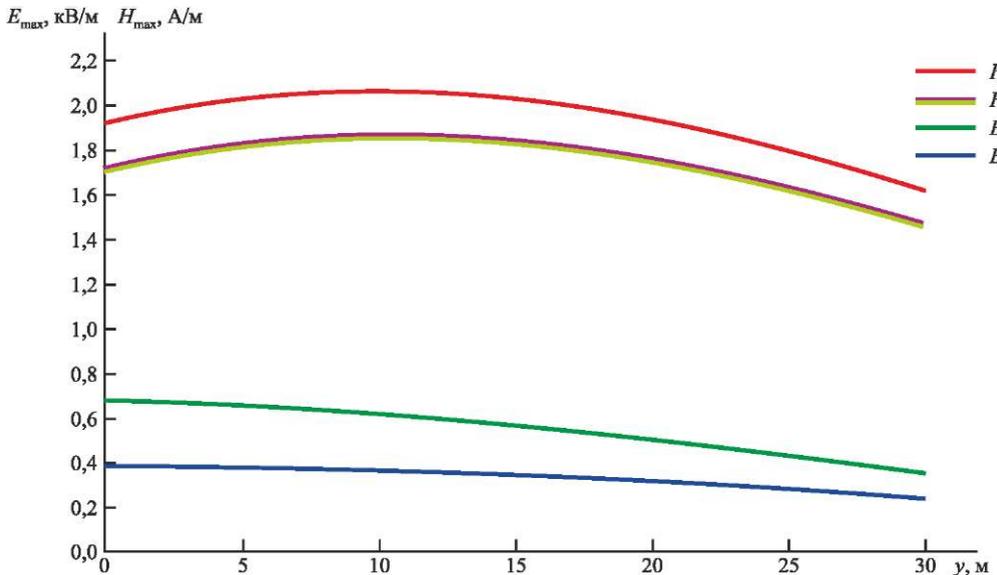


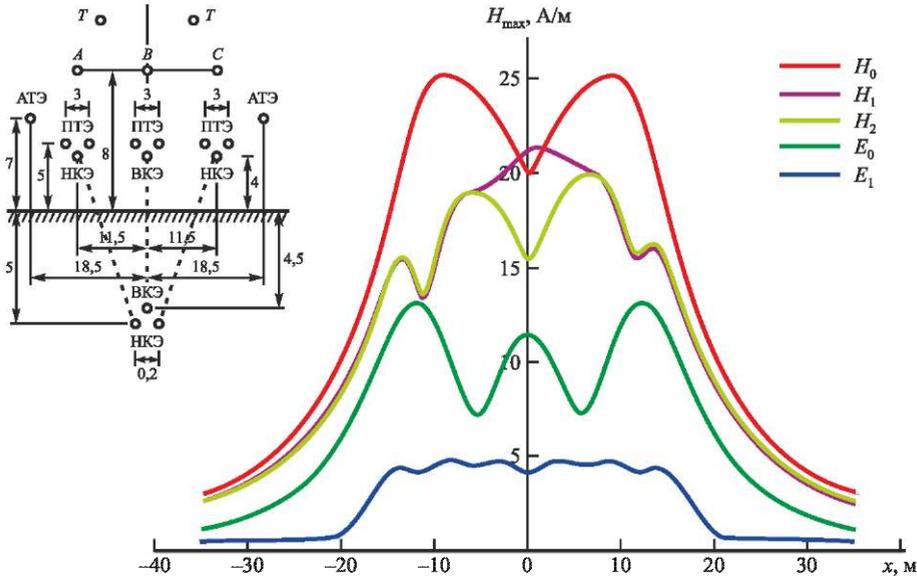
Рис. 11.22. Распределение  $H_{\max}$  и  $E_{\max}$  по вертикали при  $X = 42$  м и изменении  $Y$  от 0 до 30 м на границе санитарно-защитной зоны ВЛ-500 кВ с минимальным габаритом 10 м при отсутствии экранов ( $E_0$  и  $H_0$ ); при двух пассивных НКЭ ( $H_1$ ); при двух АТЭ с напряжениями  $63,5e^{-j180}$  и  $63,5e^{-j60}$  кВ, трех ПТЭ и двух верхних проводников НКЭ ( $E_1$ )

Применение пассивных НКЭ приводит к снижению напряженности МП на этом уровне до значения  $H_{\max} = 1,87 \text{ А/м}$  (кривая  $H_1$  на рис. 11.22).

На границе рассматриваемой зоны напряженность ЭП, создаваемого как неэкранированной, так, тем более, и экранированной линией, значительно меньше  $1 \text{ кВ/м}$  (кривые  $E_0$  и  $E_1$ ).

При экранировании МП ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом до земли 8 м ПТЭ расщеплены на два провода с радиусом расщепления 1,5 м и их центры располагаются на высоте  $Y = 5 \text{ м}$  с координатами по оси  $Ox$ :  $\pm 11,5$  и  $0 \text{ м}$ .

Центры верхних проводов пассивных НКЭ находятся над землей на высоте 4 м и смещены от оси ВЛ на  $\pm 11,5 \text{ м}$  (рис. 11.23).



**Рис. 11.23.** Распределение на уровне 1,8 м от поверхности земли напряженностей ЭП и МП в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом 8 м при отсутствии экранов ( $E_0$  и  $H_0$ ); при трех ПТЭ и двух АТЭ ( $E_1$ ) при двух пассивных НКЭ ( $H_1$ ); при пассивных НКЭ и ВКЭ

Центры нижних проводов пассивных НКЭ имеют координаты  $X = \pm 0,1 \text{ м}$  и  $Y = -5 \text{ м}$ .

Для такого расположения НКЭ длиной  $d = 1000 \text{ м}$  в экранах будут наводиться ЭДС:  $E'_1 = 105,87e^{-j101,1^\circ} \text{ В}$  в левом НКЭ и  $E'_2 = 105,87e^{j41,1^\circ} \text{ В}$  – в правом, токи в обоих пассивных экранах составят:

$$I_{K1} = 150,6e^{j173,6^\circ} \text{ А}; \quad I_{K2} = 145,5e^{-j29,1^\circ} \text{ А}.$$

Использование нижних проводов крайних групп ПТЭ в качестве верхних проводов НКЭ не изменяет картину распределения напряженности  $E_{\max}$  экранированного ЭП в сечении рассматриваемой линии, так как наведенные в контурных экранах (нижние провода НКЭ заземлены) напряжения относительно земли очень малы по сравнению с напряжением ВЛ.

Применение двух пассивных НКЭ для экранирования МП ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом 8 м не позволяет снизить напряженность  $H_{\max}$  до значений меньших  $16 \text{ А/м}$ , но под средней фазой  $H_{\max}$  остается большей  $20 \text{ А/м}$ .

Для уменьшения напряженности МП под средней фазой возможно применение пассивного вертикального КЭ с использованием в качестве его верхнего провода нижний провод средней группы ПТЭ. Нижний провод ВКЭ будет иметь координаты  $X = 0$  м,  $Y = -4,5$  м (см. рис. 11.23). В пассивном ВКЭ токами фаз наводится ЭДС  $E_{\text{ВКЭ}} = 53,19e^{j150^\circ}$  В. Величины токов в НКЭ и ВКЭ будут  $I_{K_1} = 152,06e^{j178,7^\circ}$  А,  $I_{K_2} = 150,31e^{-j33,9^\circ}$  А,  $I_{\text{КВ}} = 80,94e^{-j72,5^\circ}$  А.

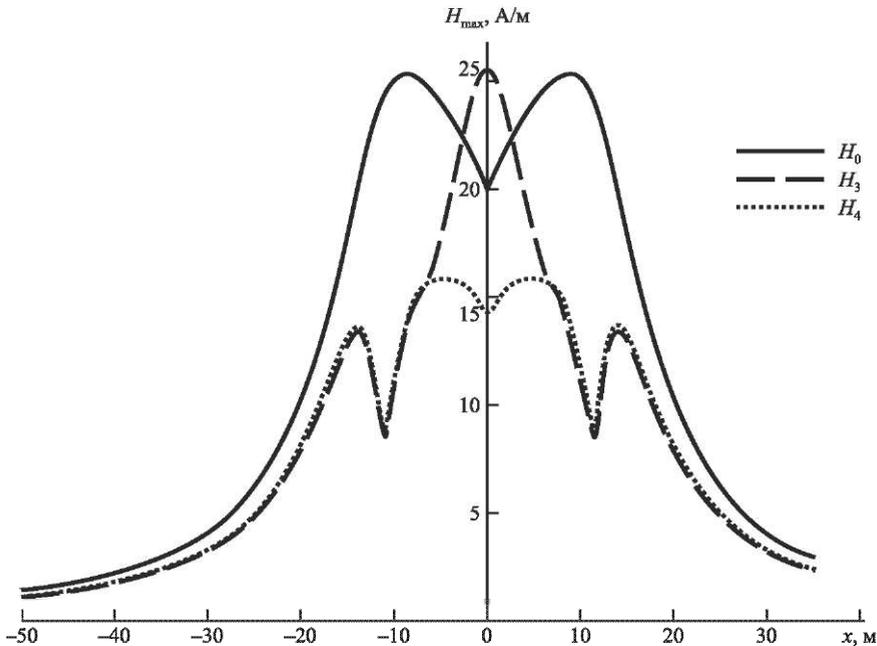
В результате применения пассивных НКЭ и ВКЭ (см. рис. 11.23, кривая  $H_2$ ) непосредственно под средней фазой напряженность  $H_{\text{max}}$  становится меньше 16 А/м, но при  $X \approx -8$  м  $H_{\text{max}} \approx 19$  А/м, а при  $X \approx 8$  м  $H_{\text{max}} \approx 20$  А/м.

С целью увеличения эффективности экранирования МП ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом «провод фазы – земля» 8 м и током 1050 А следует перевести НКЭ и ВКЭ в режим активных экранов.

Задаваясь значениями токов в КЭ:  $I_{K_1} = 220e^{j180^\circ}$  А,  $I_{K_2} = 220e^{-j60^\circ}$  А и  $I_{\text{КВ}} = 120e^{j60^\circ}$  А, получим величины ЭДС, включаемые в цепи контурных экранов:

$$E'_2 = 100,42e^{-j23,9^\circ} \text{ В}; \quad E'_1 = 62,97e^{-j70,0^\circ} \text{ В}; \quad E'_B = 31,37e^{j121,8^\circ} \text{ В}.$$

Применение активных НКЭ и ВКЭ позволяет уменьшить напряженность МП под ВЛ 500 кВ с габаритом «провод фазы–земля» 8 м до значений меньших 16 А/м (рис. 11.24, 11.25).



**Рис. 11.24.** Распределение напряженности МП на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ с минимальным габаритом 8 м при использовании активных НКЭ и ВКЭ при отсутствии экранов ( $H_0$ ); при активных НКЭ ( $H_3$ ); при активных НКЭ и ВКЭ ( $H_4$ )

Применение устройств экранирования ЭП ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом 8 м позволяет:

- уменьшить  $E_{\text{max}}$  на границе санитарно-защитной зоны до значений меньших 0,3 кВ/м;

- уменьшить напряженность  $H_{\max}$  МП до значений меньших 1,8 А/м, при использовании пассивных НКЭ и ВКЭ и до значений  $H_{\max} \approx 1,65$  А/м – в случае применения активных НКЭ и ВКЭ.

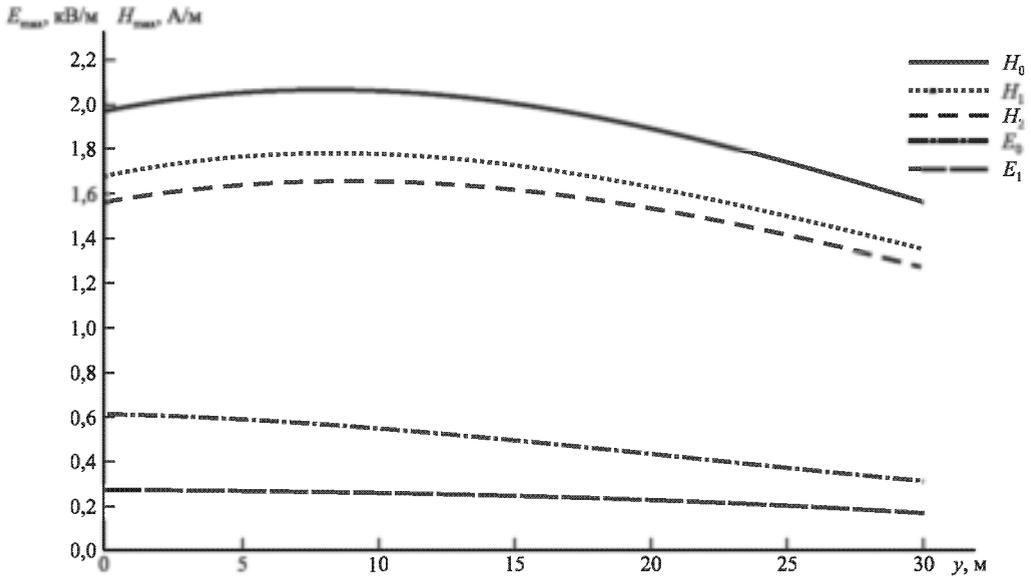


Рис. 11.25. Распределение  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$  по вертикали при  $X = 42$  м и изменении  $Y$  от 0 м до 30 м на границе санитарно-защитной зоны ВЛ-500 кВ с минимальным габаритом 8 м при отсутствии экранов ( $E_0$  и  $H_0$ ); при трех ПТЭ верхних проводах НКЭ, верхнем проводе ВКЭ и двух АТЭ ( $E_1$ ); при пассивных НКЭ и ВКЭ ( $H_1$ ); при активных НКЭ и ВКЭ ( $H_2$ )

\*\*\*

Использование в особых случаях тросовых и контурных экранов позволяет уменьшить величины напряженностей электрического и магнитного полей до значений не превышающих предельно допустимые уровни для населенной местности и зон жилой застройки и обеспечить без генеральной реконструкции ВЛ 500 кВ ее прохождение по селитебным территориям.

Для каждого конкретного случая сближения населенной местности и зон жилой застройки с трассами ВЛ СВН необходимо проведение технико-экономического сравнения всех вариантов обеспечения экологической безопасности: перенос трассы ВЛ в ненаселенную местность, перевод участка воздушной ЛЭП в кабельную, увеличение высоты опор линии, установка на участках ВЛ тросовых и контурных экранов и т.д.

### 11.3.8. Роль растительных массивов в ограничении электрического поля ВЛ 500 кВ

Рассмотрим, небесспорный в настоящее время, способ использования проводимости растений: деревьев и кустарников, для ограничения напряженности электрического поля до безопасных величин. При положительных температурах сопротивление веток деревьев составляет около 1–35 МОм на 1 м длины веток. При отрицательных

температурах сопротивление веток увеличивается до 100–500 МОм/м. Сопротивление корневой системы деревьев и кустарников (30–40 кОм) мало по сравнению с сопротивлением стволов и веток. Поэтому при высоте древесно-кустарниковой растительности под проводами линии 4–5 м падение напряжения на них не превышает десятков вольт при положительных температурах и нескольких киловольт (до 3–5 кВ) при отрицательных температурах. В результате средняя напряженность в массиве древесно-кустарниковой растительности под линией не превышает 1 кВ/м при отрицательных температурах и 0,01 кВ/м при положительных температурах, это обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных под линиями.

Проблема заключается только в том, чтобы обеспечить ограничение высоты растительных массивов под линиями на уровне 4–5 м. По данным специалистов лесного хозяйства на территории России имеется более 100 древесно-кустарниковых пород удовлетворяющих этим требованиям. Примером таких пород в Европейской части России может служить лесной орех-фундук. В Сибири подходящим растением является кедровый стланик, также дающий ценную продукцию (кедровый орех). В районах с умеренным климатом (большая часть Европейской зоны страны и южные районы Сибири и Дальнего Востока целесообразно выращивать фруктовые деревья на трассах линий (яблоня, вишня, слива, черешня). Выполненные измерения напряженности электрического поля под линиями 750 кВ на Урале показали, что напряженность поля в междурядьях яблоневых садов снижается в несколько раз, а в кронах деревьев и непосредственно под ними напряженность поля не отличается от напряженности поля земли (до 150 В/м). Однако зона высокой напряженности поля ограничена верхней границей кроны деревьев.

В последних изданиях ПУЭ был внесен п. 2.5.106 (1), разрешающий нахождение под линиями электропередач фруктовых деревьев с высотой не более 4 м.

В дополнение к естественному способу решения проблемы экологической совместимости линий электропередачи с окружающей средой может быть предложена компактизация линии. Сближение фаз и расположение их по треугольнику (вершиной вверх или вершиной вниз) позволяет значительно уменьшать электромагнитные поля линий.

## **11.4. Экологическое влияние коронного разряда**

Коронный разряд на линиях электропередачи создает помехи радио- и телевизионному приему, а также акустический шум. Основная причина радиопомех и шума – стримерная корона на проводах. Поскольку наиболее благоприятные условия для возникновения стримерной короны складываются при атмосферных осадках, когда значительно снижается начальная напряженность поля, наиболее сильные радиопомехи и акустический шум возникают при коронировании линий сверхвысокого напряжения во время дождя и снега. В хорошую погоду помехи возрастают по мере загрязнения проводов.

### **11.4.1. Радиопомехи**

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частотах выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками помех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей напряженности электрического поля вблизи поверхности земли ( $E_2$ ). Уровень радиопомех (дБ) определяется величиной

$$Y = 10 \lg \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \left( \frac{E_2}{E_1} \right),$$

где  $E_1$  – базовая напряженность электрического поля, мкВ/м.

Обычно за базовое значение принимают  $E_1 = 1$  мкВ/м, тогда

$$Y = 20 \lg E.$$

В качестве расчетной частоты по рекомендации Международного комитета по радиопомехам принимается 0,5 МГц. Уровень полезного сигнала при этой частоте составляет примерно 60 дБ. Радиоприем считается удовлетворительным, если полезный сигнал превышает помехи на 20 дБ. Поэтому допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что в соответствии с (11.2) даст  $E = 100$  мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля радиопомех принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции на землю крайнего провода линии электропередачи напряжением 330 кВ и выше.

По мере удаления от линии уровень помех снижается. Между уровнями радиопомех  $Y_1$  и  $Y_2$  на расстояниях соответственно  $l_1$  и  $l_2$  существует зависимость

$$Y_2 - Y_1 = 20k \lg \left( \frac{l_1}{l_2} \right),$$

где  $k$  – коэффициент затухания, равный 1,6 в диапазоне частот 0,15–1 МГц.

Зависимость между уровнем радиопомех и напряженностью электрического поля на поверхности проводов линейна и выражается эмпирической формулой

$$Y_2 - Y_1 = k_f (E_{\text{пр}2} - E_{\text{пр}1}),$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  – уровни радиопомех, дБ, при напряженностях на проводах  $E_{\text{пр}1}$  и  $E_{\text{пр}2}$ , кВ/см;  $k_f$  – коэффициент, равный 1,8 при напряженностях поля на проводах 20–30 кВ/см.

Увеличение радиуса проводов при неизменной напряженности поля на них приводит к росту уровня радиопомех, поскольку спад напряженности поля у провода в радиальном направлении при этом замедляется и создаются условия для развития более интенсивной стримерной короны. Связь между уровнями радиопомех и радиусами проводов устанавливается эмпирической формулой

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы проводов.

Радиопомехи практически не зависят от числа составляющих проводов расщепленной фазы, поскольку происходит взаимное электромагнитное экранирование проводов фазы.

Если известны уровень радиопомех  $Y_1$  на нормированном расстоянии от линии и параметры  $E_1$  и  $r_1$  тщательно исследованной базовой линии электропередачи, то уровень радиопомех при хорошей погоде  $Y_2$ , создаваемый другой линией, например проектируемой с параметрами  $E_2$  и  $r_2$ , может быть определен по обобщенной формуле

$$Y_2 = Y_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg \frac{r_2}{r_1}.$$

### 11.4.2. Акустический шум

Акустический шум возникает главным образом в плохую погоду, когда усиливается интенсивность коронирования проводов. Звуковой эффект при этом имеет две составляющие:

- 1) шипение, соответствующее частоте 100 Гц и кратным ей частотам;
- 2) широкополосный шум.

Первая составляющая обусловлена движением объемного заряда у проводов, что дважды за период создает волны звукового давления. Вторая генерируется стримерной короной.

Уровни громкости шумов в дБ (А) измеряются с применением корректирующих фильтров типа А, которые позволяют учесть физиологические особенности органов слуха человека (психометрическую характеристику).

Особенно интенсивный шум от короны возникает при сильном дожде, однако такой дождь сам создает шум, превышающий по громкости возможные акустические помехи от линии электропередачи. Поэтому более существенны помехи при морозящем дожде, в туман, при мокрых проводах после сильного дождя. Уровень громкости в этих случаях на 5–6 дБ (А) ниже, чем в сильный дождь, но значительно превышает общий звуковой фон. Оценка акустического шума делается по условиям «влажных» проводов.

Для оценки громкости при дожде может быть использована эмпирическая формула

$$A = 16 + 1,14E_{\max} + 9r + 15 \lg l - 10 \lg l,$$

где  $A$  – уровень громкости, дБ (А);  $r$  – радиус провода, см;  $E_{\max}$  – максимальная напряженность поля на поверхности проводов, кВ/см;  $n$  – число проводов в расщепленной фазе;  $l$  – расстояние от крайней фазы, м.

В соответствии с действующими в РФ нормами для чистых районов допустимые напряженности на поверхности проводов ВЛ определяются акустическими помехами при диаметре проводов  $d > 3,26$  см. В районах с промышленным загрязнением допустимые напряженности определяются радиопомехами при  $d = 2,7$ – $3,3$  см и акустическим шумом при  $d > 3,3$  см.

### 11.4.3. Нормативная база на радиопомехи и акустические шумы

Для решения задач электромагнитной совместимости линий электропередачи и радиоприемных устройств различного назначения (т.е. для обеспечения их функционирования без ухудшения качественных показателей) важное значение имеют реальные уровни напряженности поля помех, создаваемые ВЛ.

Помехи от ВЛ могут возникать не только от короны на проводах, но и вследствие частичных разрядов и короны на изоляторах, пробоя или перекрытия дефектных изоляторов, короны на линейной арматуре и распорках проводов расщепленной фазы, а также из-за искрения между элементами линейной арматуры, распорок проводов и между изоляторами.

Снижению радиопомех от ВЛ и улучшению электромагнитной обстановки вдоль трасс способствует нормирование уровней радиопомех от ВЛ. Принятие норм создает юридическую основу взаимоотношений между проектировщиками и владельцами радиоприемных средств и объектов. Нормирование радиопомех от ВЛ требует от проектировщиков и владельцев ВЛ принятия мер к тому, чтобы уровень радиопомех не превышал допустимых величин в течение заданного процента годового времени.

Сравнение норм различных стран на радиопомехи от линий электропередачи

Страна	Частота измерения	Место измерения	Погодные условия, % времени	Нормы, дБ	Допустимые уровни радиопомех на расстоянии 100 м от проекции крайней фазы на землю. Прибор СИСПР, дБ	
					В хорошую погоду	80 % времени
РФ	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы 100 м	80	43	37,0	43,0
США	1 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы ВЛ 362 кВ – 14 м ВЛ > 550 кВ – 20 м	80	52 (ANSI)	27,3 29,6	33,3 35,6
Канада	1 МГц	Под линией. $N$ – число зданий в зоне 60 м от проекции крайней фазы	В хорошую погоду	34 (ANSI) ( $N > 50$ ) 40 (ANSI) ( $N = 10-50$ ) 43,5 (ANSI) ( $N < 10$ )	7,3 13,3 16,8	26,3 19,3 22,8
Бразилия	1 МГц	На границе зоны отчуждения (30 м)	В хорошую погоду	42 (ANSI)	23,3	29,3
Япония	1 МГц	Под линией	50, дождь	53	24,9	30,9
Индия	0,5 МГц	На границе зоны отчуждения 30 м 45 м	В хорошую погоду	46 46	24,7 30,7	30,7 36,7
Италия	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы 15 м	80	60	32,3	38,3
Швейцария	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы 20 м	50, хорошая погода	46	27,6	33,6
ЧССР	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы				
		ВЛ 500 кВ – 55 м ВЛ 750 кВ – 70 м	80	40 40	25,0 31,2	31,0 37,2
Польша	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы на землю	В хорошую погоду	57,5	37,0	43,0

В большинстве стран установлены национальные нормы на величины напряженности поля помех, создаваемых воздушными линиями электропередач и высоковольтным оборудованием.

В табл. 11.4 приведены нормы на радиопомехи от ВЛ ряда стран.

Для сравнения требований национальных норм допустимые уровни радиопомех были пересчитаны на расстояние 100 метров от ВЛ и на частоту 0,5 МГц, рекомендованную СИСПР (Международный специальный комитет по радиопомехам) в качестве базисной при расчетах.

Из таблицы видно, что нормы Российской Федерации, так же как нормы Польши, устанавливают более высокие уровни допустимых помех, чем нормы других стран.

Для оценки мешающего влияния ВЛ на радиоприем должны быть использованы не только абсолютные значения напряженности поля помех, но и значения отношения сигнал/помеха.

Понятие отношения сигнал/помеха означает отношение напряженности поля полезного сигнала и напряженности поля помех, измеренных в одном и том же месте.

Одна и та же линия электропередачи может считаться источником значительных помех для районов с низким уровнем полезного сигнала и малых помех в зонах с высоким уровнем сигнала.

Исходной величиной при разработке норм на радиопомехи является гарантированный уровень защищенного полезного сигнала. В соответствии с международной практикой за минимальную напряженность поля радиосигнала, которую необходимо защищать от помех на частоте 1 мегагерц, принят уровень 60 децибел, а на частоте 0,5 мегагерц – 66 децибел.

Взаимосвязь между отношением сигнал/помеха и качеством приема устанавливалась опытным путем.

В табл. 11.5 приведены критерии качества приема в зависимости от отношений сигнал/помеха. Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета радио величина защитного отношения сигнал/помеха составляет 26 дБ.

В табл. 11.6 приведены отношения сигнал/помеха на расстоянии 100 метров от проекции крайней фазы на землю, полученные при выполнении национальных норм для различных вероятностей  $p$  обеспечения указанного качества приема.

Таблица 11.5

**Допустимые отношения сигнал/помеха  $S/N$ , дБ,  
требуемые для разных градаций качества приема АМ радиовещания,  
полученные из разных источников**

Критерий качества	Канада $S/N$ , дБ	IEEE $S/N$ , дБ	СИГРЕ $S/N$ , дБ	СИСПР $S/N$ , дБ
Совершенно удовлетворительно для классической музыки	39			40
Удовлетворительно для обычного прослушивания	31	31	30	32
Фоновая помеха весьма умеренна	26	26	24	26
Фоновая помеха заметна	21	21	18	20
Фоновая помеха очень заметна	15	15	12	15
Трудно различить полезный сигнал	9	4	6	8

**Отношение сигнал/помеха на расстоянии 100 м  
от проекции крайней фазы на землю, полученное  
при выполнении национальных норм**

Страна	Отношение сигнал/помеха $S/N$ , полученное при вероятности $p$		
	$p = 0,95$	$p = 0,9$	$p = 0,8$
РФ	18	20	23
США	27 25	29 27	32 30
Канада	44 41 38	46 43 40	49 46 42
Бразилия	31	33	36
Япония	30	32	35
Индия	30 24	32 26	35 29
Италия	22	24	27
Швейцария	27	29	32
ЧССР	30 24	32 26	34 29
Польша	18	20	23

Надежность качественного приема определяется вероятностью того, что в заданном проценте случаев осуществления приема фактическое значение отношения сигнал/помеха на входе приемного устройства окажется не ниже значения, минимально допустимого для обеспечения приема с заданным качеством.

Из табл. 11.6 видно, что для РФ и Польши на расстоянии 100 метров от ВЛ фоновая помеха заметна (критерий качества 4), в то время как в соответствии с национальными нормами других стран обеспечивается критерий качества 2 и 3, а для Канады – 1 (совершенно удовлетворительно для классической музыки), при надежности обеспечения указанного качества приема 95 %.

В табл. 11.7 приведены расстояния от ВЛ для указанных отношений сигнал/помеха при различных вероятностях обеспечения качества. Из таблицы видно, что для РФ отношение сигнал/помеха 26 дБ, рекомендованное Международным консультативным комитетом радио обеспечивается с надежностью ( $p = 0,95$ ) только на расстояниях, в 1,5–2 раза превышающих нормированное 100 м. В то же время для большинства других стран рекомендованное отношение  $S/N = 26$  дБ обеспечивается на значительно меньших расстояниях, так для Канады это расстояние 20–40 метров.

Для России нормы выполняются только при отношении сигнал/помеха, равной 22 дБ, с вероятностью обеспечения качества 80 %.

Расстояние от проекции крайней фазы на землю, на котором обеспечивается заданное отношение сигнала/помеха  $S/N$ , при выполнении национальных норм

Страна	Расстояние от ВЛ для данного сигнала/помехи $S/N$ , полученной при вероятности $p$ , м											
	$S/N = 26$ дБ			$S/N = 24$ дБ			$S/N = 22$ дБ					
	$p = 0,95$	$p = 0,9$	$p = 0,8$	$p = 0,95$	$p = 0,9$	$p = 0,8$	$p = 0,95$	$p = 0,9$	$p = 0,8$	$p = 0,95$	$p = 0,9$	$p = 0,8$
РФ	177,4	151,0	124,6	153,5	130,6	107,6	132,7	112,8	107,6	132,7	112,8	92,9
США	87,3 103,5	74,0 87,8	60,6 72,0	75,2 89,3	63,6 75,7	51,9 62,0	64,7 76,9	54,6 65,1	51,9 62,0	64,7 76,9	54,6 65,1	44,3 53,2
Канада	21,3 28,7 38,8	16,4 23,1 32,1	10,6 17,2 25,2	16,9 23,7 32,8	12,0 18,6 26,8	5,3 12,8 20,5	12,5 19,1 27,4	7,3 14,2 22,0	5,3 12,8 20,5	12,5 19,1 27,4	7,3 14,2 22,0	- 8,2 16,1
Бразилия	64,7	54,6	44,3	55,5	46,7	37,7	47,5	39,7	37,7	47,5	39,7	31,7
Япония	73,0	61,7	50,4	62,8	52,9	42,9	53,8	45,2	42,9	53,8	45,2	36,4
Индия	71,9 112,2	60,8 95,3	49,6 78,3	61,8 96,8	52,1 82,2	42,3 67,4	53,0 83,5	44,5 70,7	42,3 67,4	53,0 83,5	44,5 70,7	35,8 57,9
Италия	126,1	107,2	88,2	108,9	92,5	76,0	94,0	79,7	76,0	94,0	79,7	65,4
Швейцария	89,3	75,7	62,0	76,9	65,1	53,2	66,2	55,9	53,2	66,2	55,9	45,4
ЧССР	73,6 116,3	62,2 98,8	50,7 81,3	63,3 100,5	53,3 85,3	43,3 70,0	54,3 86,7	45,6 73,4	43,3 70,0	54,3 86,7	45,6 73,4	36,7 60,1
Польша	177,4	151,0	124,6	153,5	130,6	107,6	132,7	112,8	107,6	132,7	112,8	92,9

Из приведенных материалов видно, что требования норм РФ невысоки и электромагнитная обстановка вдоль трассы ВЛ значительно хуже, чем в других странах.

В табл. 11.8 приведены нормы на акустические помехи от линий электропередач. Для сравнения норм разных стран допустимые уровни акустических шумов были пересчитаны на 100 м от ВЛ. Как и в случае с нормами на радиопомехи, нормы на акустические помехи в РФ оказались значительно слабее, чем в других странах.

Таблица 11.8

**Сравнение норм разных стран на акустический шум от линий электропередачи с мокрыми проводами**

Страна, организация	Место измерения	Нормы, дБ (А)	Допустимые уровни акустических шумов на расстоянии 100 м от проекции крайней фазы на землю, мокрый провод, дБ (А)
РФ	Расстояние от проекции крайней фазы 100 м	52,0	52,0
СИГРЭ	На границе зоны отчуждения (45 м)	50,0	40,5
Индия	На краю зоны отчуждения (30 м)	55,0	44,0
Италия (УВН)	Расстояние от проекции крайней фазы 15 м	57,0	44,0
Япония	Непосредственно под линией	50,0	35,5
США, нормы AEP-ASEA	Расстояние от проекции крайней фазы 30 м	55,0	44,0
США, нормы GE	Расстояния от проекции крайней фазы		
	ВЛ 362 кВ – 14 м	55,0	42,0
	ВЛ 550 кВ – 20 м	55,0	43,4
	ВЛ 800 кВ – 29 м	55,0	43,9
	ВЛ 1200 кВ – 43 м	55,0	45,3

Надо иметь в виду, что акустические помехи непосредственно связаны с напряженностью электрического поля на поверхности проводов и площадью их поверхности. Интенсивность акустических помех при удалении от линии уменьшается значительно медленнее, чем интенсивность радиопомех. Интенсивность акустических помех резко возрастает на линиях электропередач, имеющих большое количество проводов в фазе.

Акустические помехи, создаваемые короной на проводах ВЛ, будут являться одним из определяющих факторов при выборе конструкции компактных ВЛ с большим числом проводов в фазе и ВЛ ультравысокого напряжения.

Из изложенного следует необходимость сближения норм на радио и акустические помехи по РФ с мировыми стандартами.

## 11.5. Влияния линий электропередачи на линии связи

### 11.5.1. Опасные влияния

Линии электропередачи (ВЛ) оказывают на линии проводной связи влияния, которые обусловлены различными механизмами взаимодействия и при определенном взаимном расположении между линиями электропередачи и связи могут достигать значения, представляющие опасность для обслуживающего персонала и превышающие электрическую прочность кабеля связи и вводных устройств аппаратуры уплотнения (подробнее см. Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике / С.С. Агафонов; под ред. В.Х. Ишкина. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ЭАИ, 1991).

Влияние за счет индуктивной связи обусловлено прохождением части или всего переменного тока ВЛ по цепи провод-земля. Это может иметь место, например, при несимметричной нагрузке трехфазных ВЛ, при работе ВЛ по системе два провода-земля, при однофазных или двухфазных замыканиях ВЛ на землю. Магнитному влиянию подвержены все линии проводной связи, как воздушные, так и кабельные.

Влияние за счет емкостной связи обусловлено наличием вокруг проводной ВЛ электрического поля. Провода линий связи (ЛС), находящиеся в зоне действия поля, оказываются под воздействием потенциала этого поля. Электрическому влиянию подвержены провода воздушных линий связи, а также кабельные линии связи, выполненные кабелем без металлических оболочек, подвешенным на опорах или стойках.

Влияние через гальваническую связь (полное сопротивление связи) обусловлено протеканием в земле силовых токов. Гальваническому влиянию подвержены заземленные металлические оболочки кабелей и цепи воздушных и кабельных ЛС, использующих землю в качестве обратного провода.

Расчет продольных ЭДС в проводах связи при аварийном режиме ВЛ с заземленной нейтралью производят для наиболее неблагоприятного случая положения точек короткого замыкания, изменяя места их расположения по длине сближения.

При расчете продольной ЭДС рассматривают короткое замыкание ВЛ из графика в самой неблагоприятной точке, т.е. случай, когда влияние будет наибольшим. Обычно это соответствует короткому замыканию в начале или конце сближения.

**Экранирование.** При расчетах уровней влияния ВЛ и ЛС необходимо учитывать экранирующее действие различных металлических коммуникаций, расположенных в зоне влияния и соединенных с землей. К таким коммуникациям могут быть отнесены железнодорожные рельсы, трубопроводы, оболочки силовых кабелей и кабелей связи, тоннели и коллекторы, грозозащитные тросы ВЛ и т.д.

Экранирующее действие зависит от собственного сопротивления экрана, расположения его относительно ВЛ и ЛС, условий заземления, удельного сопротивления земли, а для экранов с магнитными материалами – также от продольной ЭДС, наводимой в экране влияющим током.

**Мероприятия по защите от опасного влияния.** Если по техническим и экономическим или эксплуатационным соображениям оказывается невозможным или нецелесообразным выбрать трассу проектируемой ВЛ или ЛС таким образом, чтобы индуцируемые в проводах ЛС напряжения не превышали допустимых значений, применяют специальные меры защиты.

К мерам защиты на ВЛ относятся:

- применение хорошо проводящих заземленных грозозащитных тросов, а также специальных проводников, проложенных в земле;
- частичное разземление нейтралей трансформаторов высоковольтной сети, обеспечивающее снижение токов короткого замыкания ВЛ;
- применение на ВЛ с изолированной нейтралью аппаратуры для контроля состояния изоляции фазовых проводов по отношению к земле или перекоса фазных напряжений, обеспечивающей скорейшее обнаружение и устранение электрического влияния ВЛ на ЛС; частичное или полное каблирование ВЛ на городских участках; использование быстродействующей защиты, ускоряющей отключение поврежденной ВЛ с заземленной нейтралью.

К специальным мерам защиты на ЛС относятся:

- включение специальных разрядников между каждым проводом и землей. Для воздушных ЛС, как правило, общее количество разрядников на 100 км ЛС не должно превышать для уплотненной цепи 15 шт., для неуплотненной цепи – 25 шт. Допустимое количество разрядников ограничивается эксплуатационными соображениями и поэтому по соглашению между заинтересованными сторонами допускается в исключительных случаях установка большего количества разрядников. Защита разрядниками цепей полуавтоматической блокировки и цепей фидерных линий проводного вещания не допускается;
- включение разделительных трансформаторов в телефонные цепи без дистанционного питания и разделительных трансформаторов с защитными контурами при наличии дистанционного питания;
- включение дренажных катушек или дросселей с заземленной средней точкой в телефонные цепи без дистанционного питания и дренажных катушек с резонансными заземляющими контурами в телефонные цепи с дистанционным питанием;
- частичное или полное каблирование ЛС;
- замена железобетонных или металлических опор ЛС на деревянные (в том числе с железобетонными приставками) в пределах усилительного участка ЛС, на котором имеются опасные сближения с ВЛ;
- по соглашению заинтересованных сторон введение высоковольтного режима обслуживания ЛС;
- включение редуцированных трансформаторов;
- замена кабеля связи на кабель с повышенным защитным действием и др.

**Разрядники.** Защита ЛС, находящейся в зоне влияния ВЛ, от опасных влияний с помощью разрядников является наиболее экономичным методом защиты. Разрядники имеют очень малую межэлектродную емкость, и их включение между проводами ЛС и землей практически не нарушает параметров каналов связи во всем используемом диапазоне частот. Основные виды разрядников, выпускаемых отечественной промышленностью, их технические параметры приведены в табл. 11.9.

**Защита цепей ЛС с помощью редуцированных трансформаторов.** Одной из мер защиты линий связи от опасного и мешающего влияния линий высокого напряжения являются применение редуцированных трансформаторов (РТ).

Применение редуцированных трансформаторов в ряде случаев дает значительный экономический эффект по сравнению с другими мерами защиты.

## Основные параметры разрядников

Тип разрядника	Параметры						Межэлектродная емкость, пФ	Габариты, мм
	Напряжение пробоя, В	Напряжение погасания, В	Амплитуда допустимого тока 50 Гц, А, в течение времени					
			1,2 с	0,6 с	0,3 с			
P-27	350±40	40–80	20	24	28	1	45 × 19	
P-34	1100±200	450–500	8	13	19	5	52 × 22	
P-35	350±40	40–80	45	47	49	5	72 × 22	
P-350	350±40	40–80	30	38	46	10	65 × 35	
P-56	80±125	20–50	20	23	26	1	57 × 14,5	
P-63	250±50	70	30	–	–	10	46 × 35	
P-76	2500±300	150	30	–	–	10	46 × 30	
P-78	700±100	150	30	–	–	8	46 × 30	

Редукционный трансформатор представляет собой два О-образных магнитопровода из электромеханической стали Э-320 (толщина пластин 0,35 мм), на которых размещена обмотка.

Роль первичной обмотки трансформатора выполняет оболочка (внешний проводник) кабеля, роль вторичной обмотки – жилы (внутренний проводник) кабеля. На магнитопроводе трансформатора размещены одновременно две одинаковые обмотки, выполненные кабелем в целях защиты с помощью одного трансформатора сразу двух кабелей при двухкабельной системе связи. При однокабельной системе связи обмотки этого трансформатора включаются последовательно.

Трансформатор размещен в стальном герметичном корпусе, покрытом антикоррозийной краской. Для ввода защищаемого кабеля в корпусе предусмотрены специальные отверстия.

Принцип действия РТ заключается в следующем.

Первичная обмотка включается в разрез металлических покровов кабеля, которые заземляются по концам защищаемого участка, вторичная обмотка – в разрез жил кабеля. При протекании тока в цепи металлические покровы – земля и, следовательно, в первичной обмотке во вторичной обмотке индуцируется ЭДС, направление которой противоположно ЭДС, индуцированной в жилах кабеля от влияния линий высокого напряжения. Таким образом, суммарная ЭДС в жилах кабеля уменьшается.

### 11.5.2. Мешающие влияния

Мешающие влияния ВЛ на цепи ЛС возникают при исправном состоянии ВЛ и действуют все время, пока ВЛ находится под напряжением.

Мешающие напряжения в телефонных каналах тональной частоты создаются электрическими полями токов и напряжений ВЛ как основной частоты, так и частот гармонических составляющих токов и напряжений ВЛ.

Мешающие напряжения в телефонных каналах высокой частоты создаются магнитными и электрическими полями токов и напряжений каналов высокочастотной связи по проводам ВЛ.

Если симметричная трехфазная ВЛ с изолированной нейтралью будет оставаться в работе при условии заземления одной из фаз на срок свыше 2 ч, то следует определять мешающее влияние такой ВЛ при ее работе в этом режиме работы.

При расчете мешающих напряжений в телефонных цепях ЛС от влияния ВЛ с изолированной нейтралью учитывается магнитное влияние фазовых токов и электрическое влияние фазных напряжений ВЛ в нормальном режиме ее работы при ширине сближения до 30 м и только магнитное влияние фазных токов при ширине сближения свыше 30 м.

При аварийном режиме работы такой ВЛ учитывается электрическое влияние фазных напряжений. При расчетах мешающих влияний в телефонных цепях ЛС от ВЛ с заземленной нейтралью необходимо учитывать магнитное влияние фазных токов, токов нулевой последовательности и электрическое влияние фазных напряжений ВЛ при ширине сближения до 50 м. При ширине сближения от 50 до 200 м учитывается магнитное влияние фазных токов и токов нулевой последовательности, при ширине сближения более 200 м – только магнитное влияние токов нулевой последовательности.

**Меры защиты от мешающего влияния.** К специальным мерам защиты на ВЛ относятся запрещение режима работы по системе два провода–земля или провод–земля.

К специальным средствам защиты на ЛС относятся:

- частичная или полная замена воздушной ЛС на кабельную. Это дает возможность полностью исключить электрическое влияние на участках каблирования, снизить напряжение помех от магнитного влияния в соответствии с коэффициентом экранирования оболочки и брони кабеля, а также практически не считаться с возможностью влияния высокочастотных каналов связи по ВЛ на ВЧ каналы по цепям ЛС, работающих в совпадающем спектре частот;
- применение кабелей со специальной оболочкой и броней, обеспечивающих повышенное экранирующее действие от влияния ВЛ;
- изменение профиля ЛС с крюкового на траверсный;
- отказ от использования каналов тональной частоты и замена их высокочастотными каналами;
- применение в телефонных каналах специальных устройств, позволяющих снизить эффективность воздействия помех на передаваемый разговор в 3–4 раза; использование на кабельных ЛС редуцированных и других трансформаторов.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Объясните механизмы воздействия электрических полей на живые организмы.
2. Объясните механизмы воздействия магнитных полей на живые организмы.
3. Почему возбуждаются клеточные структуры при воздействии электрических и магнитных полей.
4. Объясните термическое действие электромагнитных полей на живые организмы.
5. Каковы биологические эффекты, вызываемые электрическими, магнитными и электромагнитными полями?

6. Каковы возможные механизмы воздействия на живые организмы слабых полей промышленной частоты?
7. Какие напряженности полей для населения и на рабочих местах допустимы?
8. Каково экологическое влияние короны воздушных линий электропередачи?
9. Какой допустимый уровень радиопомех от воздушных линий?
10. Каково влияние линий электропередачи на линии связи?
11. Какие напряженности электрических полей допустимы под воздушными линиями электропередачи?
12. Что такое электросmog?
13. Как определяется допустимое время пребывания персонала в электрическом поле промышленной частоты?
14. Какие напряженности постоянного магнитного поля допустимы для человека?

## ГЛАВА 12

---

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ВН

---

### 12.1. Общие положения

В идеальной электроэнергетической системе (ЭЭС) энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. В реальных энергосистемах эти условия не выполняются вследствие того, что многие потребители электроэнергии имеют нелинейные характеристики нагрузки (вентильные преобразователи, силовая электронная преобразовательная техника, электродуговые сталеплавильные печи на металлургических заводах и предприятиях других отраслей промышленности).

Проблема искажения синусоидальной формы кривых тока и напряжения составляет основу этой главы.

Возросший интерес к этой проблеме связан с увеличением числа и единичной мощности нелинейных электронных устройств, используемых для управления силовыми установками и системами.

Отклонения форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Гармоника определяется как значение сигнала с частотой, кратной фактической частоте сети, например основной частоте сигнала, производимого генератором. Следует различать гармоники в установившихся режимах, когда форма кривой не изменяется, и гармоники в переходных режимах, когда форма кривой существенно меняется от цикла к циклу.

Существенной характеристикой, определяющей форму кривой, является фазовый угол (угол сдвига) гармоники по отношению к основной частоте. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их относительного положения.

Как и многие другие формы искажений, гармоники воздействуют на все виды электрического оборудования, находящегося на довольно большом расстоянии от места генерации гармоник.

Наиболее ясно ощущается влияние гармоник, возникающих в силовых цепях, на качество звука телефонной связи, снижающегося из-за наводимого силовыми гармониками гармонического шума. Однако существуют и другие, менее слышимые, но зачастую более опасные воздействия, выражающиеся в ложных срабатываниях ответственной управляющей и защитной аппаратуры, перегрузке силовых аппаратов и систем. Очень

часто длительное существование искаженной кривой напряжения приводит к разрушению силовых конденсаторов. Кроме того, при неблагоприятном состоянии электрической сети придется чаще ремонтировать или заменять выходящие из строя элементы. В этом случае применение даже элементарных мер защиты оборудования в виде фильтров, устанавливаемых у потребителя, приводит к существенному улучшению кривой напряжения.

Большое развитие получили технологии, основанные на использовании управляемых выпрямителей, что привело к увеличению уровня гармоник тока в сетях. Вместе с тем при разработке такого оборудования обычно предполагают, что напряжение в точке присоединения синусоидально. Это возможно лишь в случае, если энергетическая система, питающая оборудование, имеет малое гармоническое сопротивление. Следовательно, мелкие потребители, питающиеся от такой сети, подвергаются дополнительным опасностям, связанным с влиянием гармоник на управляющее оборудование, установленное в их сетях.

Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей.

Однако определение допустимых уровней гармоник не является простой и однозначной задачей. Знания о токах гармоник различных источников недостаточны для того, чтобы установить пределы, в которых обеспечивалась бы электромагнитная совместимость оборудования в любой энергосистеме. Поэтому если знания о гармониках тока исходят в основном из физической сущности явления, то разработанные стандарты и рекомендации являются результатом анализа предшествующего практического опыта, используемого для того, чтобы избежать появления подобных проблем в будущем.

До тех пор пока не будет достигнуто достаточного понимания характера гармонических явлений в сложных системах, энергоснабжение будет оставаться под угрозой повышенной опасности и энергоснабжающие организации и потребители будут часто вынуждены принимать меры уже после аварий.

## **12.2. Статический преобразователь как источник гармоник и другие источники гармоник**

Для правильного расчета гармоник тока, генерируемых статическими силовыми преобразователями, необходимо иметь точную информацию о форме кривой напряжения переменного тока на выводах преобразователя, его схеме, типе системы управления, полном сопротивлении сети переменного тока и параметрах цепи постоянного тока. Однако представление столь значительного числа факторов с самого начала затруднит понимание основных положений теории. Более удобно начать оценку явления с изложения теории управления преобразователем, работающим в идеализированных системах переменного тока и постоянного тока, а затем рассмотреть поочередно влияющие факторы.

В зависимости от положения момента зажигания одного вентиля относительно другого при устойчивой работе преобразователя различают четыре принципа управления:

- 1) управление с постоянным фазовым углом, при котором включение вентиля производится через равные промежутки времени в соответствии с их коммутационными напряжениями;

- 2) симметричное управление, при котором последовательное включение вентиляей производится в одинаковые моменты синусоиды питающего напряжения;
- 3) модулированное фазовое управление, при котором включение вентиляей производится через переменные промежутки времени;
- 4) интегральное управление, выбирающее целое число циклов или полциклов питающей частоты.

Изменение фазового угла – наиболее широко используемый способ управления. Спектральный анализ Фурье прямо применим к кривым, получающимся при фазовом и симметричном управлении вентилями.

Увеличилось количество и единичная мощность принудительно коммутируемых преобразователей, в особенности инверторов, питающих привод переменного тока. Их питающим источником обычно служит система переменного тока, от которой питается выпрямитель. Гармонический же состав кривой на стороне инвертированного тока имеет характерные особенности.

Управление с постоянным фазовым углом обычно встречается в нормально коммутируемых статических преобразователях и регуляторах напряжения.

Регуляторы напряжения переменного тока, состоящие из встречно-параллельно включенных пар тиристоров в каждой фазе, генерируют изменяющиеся по амплитуде гармоники. В случае индуктивной нагрузки они могут содержать гармоники четных порядков и постоянный ток. Хотя тиристорное регулирование напряжения в настоящее время используется в основном в маломощных устройствах (таких, как регуляторы силы света электрических ламп и малые асинхронные двигатели), однако в связи с возрастающим интересом к экономии электроэнергии их использование будет расти, и они могут в будущем превратиться в существенный источник гармонических искажений.

Основными источниками гармоник тока в настоящее время являются выпрямители и инверторы с фазовым управлением. Все они могут быть разделены на три большие группы:

- 1) большие преобразователи, используемые, например, в металлургии и в передачах постоянного тока высокого напряжения;
- 2) преобразователи средней мощности, подобные используемым в промышленности для управления электромоторами и на железной дороге;
- 3) маломощные преобразователи однофазных устройств, таких как телевизоры и устройства перезарядки батарей.

Формы кривых напряжений и токов преобразователей первой группы близки к идеальным и могут быть приняты за основу для получения характеристик гармоник стандартных схем преобразователей. На эти данные обычно ссылаются при оценке гармоник в кривых, отличающихся от идеальной.

До появления статических преобразователей наличие гармонических искажений в энергосистемах ассоциировалось, в первую очередь, с работой электрических машин и трансформаторов. И действительно, основными источниками гармоник, существовавшими ранее в электрических системах, были намагничивающие токи силовых трансформаторов.

После того как выполнение требований по конструированию экономичных генераторов привело к искажению формы кривой напряжения, генераторы электрических станций стали вторым основным источником гармоник.

Современные трансформаторы и вращающиеся машины в нормальных условиях работы не вносят существенных искажений в сеть. Однако в переходных процессах и в условиях работы, отличных от проектируемых, эти искажения могут сильно увеличиться.

Кроме статических преобразователей, существует еще два вида нелинейных нагрузок, чье влияние на формы кривых напряжения и тока должно быть рассмотрено, – это дуговые печи и флюоресцентные лампы.

## 12.3. Влияние гармоник на системы электроснабжения

### 12.3.1. Элементы систем электроснабжения

После того как выявлены источники гармоник и определены их уровни, необходимо выяснить характер влияния гармоник на работу электрооборудования. Все элементы систем электроснабжения должны быть рассмотрены с точки зрения их чувствительности к гармоникам. На основе этого рассмотрения затем вырабатываются рекомендации по допустимым уровням гармоник в сетях.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- а) увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- б) снижение эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии;
- в) старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы;
- г) ложная работа оборудования.

**Резонансы.** Наличие в сетях конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и выход их из строя.

*Параллельный резонанс* возникает вследствие высокого сопротивления гармоникам тока на резонансной частоте. Так как большинство гармоник генерируется источниками тока, то это вызывает увеличение напряжения гармоник и большие их токи в каждой из параллельных ветвей.

Параллельные резонансы могут возникать в различных условиях, простейшие из них соответствуют случаю присоединения конденсаторов к тем же шинам, к каким присоединен источник гармоник. Резонанс в этом случае возникает между источником гармоник и конденсатором.

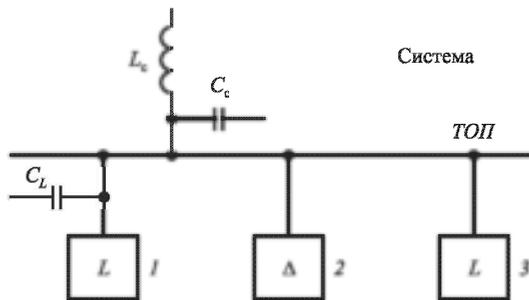
Предполагая сопротивление источника полностью индуктивным, резонансную частоту определим по формуле

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_{K3}}{Q_k}}, \quad (12.1)$$

где  $Q_k$  – мощность конденсаторов;  $S_{K3}$  – мощность короткого замыкания в точке общего присоединения.

Другая возможность возникновения параллельного резонанса иллюстрируется на рис. 12.1. Ток гармоник, идущий от их источника, встречает большое сопротивление

нагрузок на шинах. Это может привести к резонансу между индуктивностью системы  $L_c$  и емкостью либо системы  $C_c$ , либо конденсаторов нагрузки  $C_n$ .



**Рис. 12.1. Параллельный резонанс:**

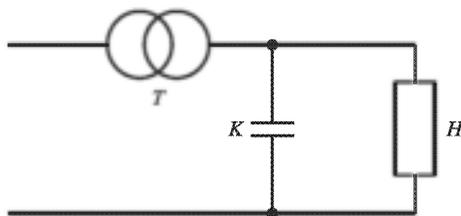
$1, 3$  – нагрузки;  $2$  – источник гармоник;  $ТОП$  – точка общего присоединения

Для того чтобы определить условия резонанса в конкретном случае, необходимо измерить токи гармоник в ветвях каждой нагрузки и ветви питания, а также напряжение гармоник на шинах. Если ток, текущий от шин в энергосистему, мал, а напряжение велико, это говорит о наличии резонанса между  $L_c$  и  $C_c$ . Если же значителен ток гармоники в ветви нагрузки  $1$  при большом напряжении гармоники на шинах, резонанс происходит между  $L_c$  и  $C_n$ .

*Последовательный резонанс* иллюстрируется на рис. 12.2. На высоких частотах сопротивление нагрузки может не учитываться, в то время как сопротивление конденсаторов резко снижается. Резонансную частоту этой цепи определяют по формуле

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_T}{Q_k e_{кз}} - 100 - \frac{P_n^2}{Q_k^2}}, \quad (12.2)$$

где  $P_n$  – мощность нагрузки;  $S_T$  – мощность трансформатора;  $e_{кз}$  – напряжение короткого замыкания, %.



**Рис. 12.2. Схема последовательного резонанса:**

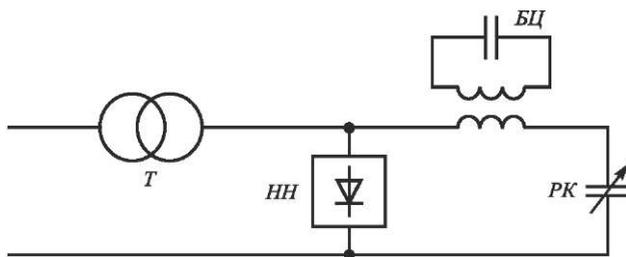
$K$  – конденсатор;  $T$  – трансформатор;  $H$  – активная нагрузка

При последовательном резонансе большой ток гармоники может течь через конденсатор при относительно небольшом напряжении гармоники. Фактическое значение тока определяется добротностью контура. Обычно она составляет порядка 5 на частоте 500 Гц.

**Влияние резонансов на системы.** Резонансы в системах электроснабжения обычно рассматриваются применительно к конденсаторам, и в частности к силовым конденсаторам. При превышении гармониками тока уровней, предельно допустимых для

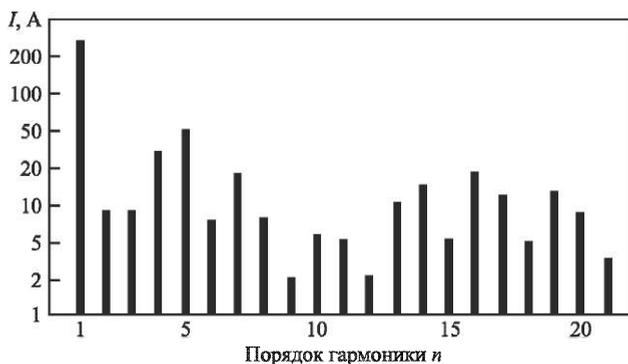
конденсаторов, последние не ухудшают свою работу, однако через некоторое время выходят из строя.

Другой областью, где резонансы могут приводить к выходу из строя элементов оборудования, являются системы управления нагрузкой с помощью тональных частот. Для того чтобы предотвратить поглощение сигналов силовыми конденсаторами, их цепи разделяются настроенными последовательными фильтрами (фильтр-пробка) (рис. 12.3). В случае местного резонанса гармоники тока в цепи силового конденсатора резко возрастают, что приводит к выходу из строя настроенного конденсатора последовательного фильтра. На рис. 12.4 приведен линейный спектр гармоник тока в цепи фильтра, замеренный на установке, где был зафиксирован выход из строя последовательного фильтра.



**Рис. 12.3.** Настроенная цепь с фильтром-пробкой для управляющего сигнала:

$T$  – трансформатор;  $БЦ$  – блокирующая цепь;  $НН$  – нелинейная нагрузка;  $ПК$  – регулирующий конденсатор



**Рис. 12.4.** Токи гармоник в блокирующей цепи

### 12.3.2. Вращающиеся машины

**Потери электроэнергии.** Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводниках статора и ротора при этом больше из-за вихревых токов и поверхностного эффекта, чем определяемые омическим сопротивлением. Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, приводят к дополнительным потерям.

В случае асинхронного двигателя с ротором со скошенными пазами и пульсирующими магнитными потоками в статоре и роторе высшие гармоники вызывают дополнительные потери в стали. Значение этих потерь зависит от угла скоса пазов и характеристик магнитопровода.

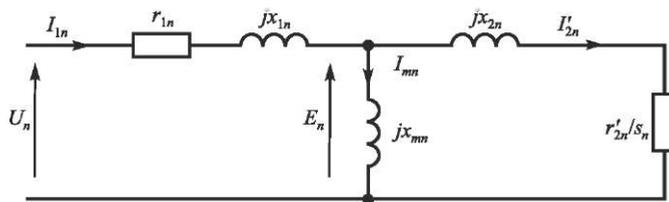
Влияние формы кривой напряжения на потери в асинхронном двигателе было показано на примере двигателя мощностью 16 кВт, работающего с полной нагрузкой при частоте сети 60 Гц и номинальном напряжении. При синусоидальной форме кривой напряжения полные потери составили 1,3 кВт, а при квазипрямоугольной форме – 1,6 кВт.

Среднее распределение потерь от высших гармоник в двигателе постоянного тока, питающегося от выпрямителя, составляет: обмотки статора 14,2 %, цепи ротора 41,2 %, торцевые зоны 18,8 %; потоки в пазах 25,8 %.

За исключением последней составляющей потерь, их распределение в синхронных машинах приблизительно аналогично. Следует отметить, что соседние нечетные гармоники в статоре синхронной машины вызывают в роторе гармоники одинаковой частоты. Например, 5-я и 7-я гармоники в статоре вызывают в роторе гармоники тока 6-го порядка, вращающиеся в разные стороны. Для линейных систем средняя плотность потерь на поверхности ротора пропорциональна  $(I_5^2 + I_7^2)^2$ , однако из-за разного направления вращения плотность потерь в некоторых точках пропорциональна  $(I_5 + I_7)^2$ .

Дополнительные потери – наиболее серьезный эффект, вызываемый гармониками во вращающихся машинах. Они приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с ротором типа «беличья клетка» допускают более высокие потери и температуру, если это не приводит к недопустимой температуре статора; поэтому двигатели с фазным ротором оказываются более чувствительными к гармоникам. Некоторые технические руководства ограничивают допустимый уровень тока обратной последовательности в генераторе 10 %, а уровень напряжения обратной последовательности на вводах асинхронных двигателей – 2 %. Допустимость гармоник определяют по тому, какие уровни напряжений и токов обратной последовательности они создают.

**Моменты вращения, создаваемые гармониками.** Эквивалентная схема асинхронного двигателя на частоте любой гармоники приведена на рис. 12.5, на котором все параметры соответствуют фактическим частотам токов в обмотках.



**Рис. 12.5. Однофазная схема замещения асинхронного двигателя на частоте  $n$ -й гармоники**

Ток гармоники в статоре машины вызывает движущую силу, приводящую к появлению на валу вращающихся моментов в направлении вращения магнитного поля гармоники. Поэтому вращающиеся моменты, создаваемые гармониками, образующими прямую последовательность, совпадают с направлением вращения ротора, а образующими обратную последовательность направлены противоположно.

При токе гармоники  $I_n$  вращающий момент на фазу составит на частоте гармоники скольжение. Приведенный к основной частоте

$$M_n = \left( \frac{I_n^2}{n} \right) \left( \frac{r'_{2n}}{S_n} \right). \quad (12.3)$$

Так как  $s_n \approx 1$ , вращающий момент в относительных единицах

$$M_n = \left( \frac{I_n^2}{n} \right) r'_{2n}, \quad (12.4)$$

где  $I_n$  и  $r'_{2n}$  также выражены в относительных единицах.

Используя соотношения  $U_n = I_n Z_n$  и  $Z_n \approx nx_1$ , преобразуем (12.4) к виду

$$M_n = \left( \frac{U_n^2}{n^3} \right) \left( \frac{r'_{2n}}{X_1^2} \right). \quad (12.5)$$

Так как значение скольжения для токов всех гармоник практически одинаково, относительные вращающие моменты весьма малы, к тому же они частично компенсируются вследствие различного направления. Поэтому влияние их на средний момент пренебрежимо мало (рис. 12.6).

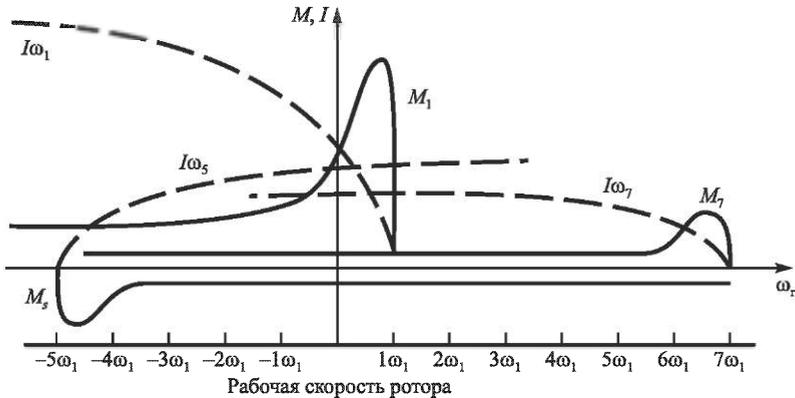


Рис. 12.6. Зависимость моментов и токов гармоник ротора  $I$  от скорости ротора  $\omega$

Вместе с тем они могут привести к значительной вибрации вала. Приведем следующее приближенное выражение для момента вибрации, приведенного к номинальному напряжению:

$$M_{3k}^- = \left[ I_{n+}^2 + I_{n-}^2 - 2I_{n+}I_{n-} \cos(\varphi_{n+} + \varphi_{n-}) \right]^{1/2}, \quad (12.6)$$

где  $I_{n+}$  и  $I_{n-}$  — относительные токи.

Это выражение позволяет оценить в первом приближении возможность возникновения вибрации.

### 12.3.3. Статическое оборудование

**Линии электропередачи.** Гармоники тока в линиях приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения.

В случае кабельных линий гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимальной амплитуды напряжения. Это, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабеля и стоимость ремонтов.

В линиях сверхвысокого напряжения гармоники напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут вызывать увеличение потерь энергии на корону.

**Трансформаторы.** Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь энергии на гистерезис, потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках. Кроме того, сокращается срок службы изоляции.

Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в случае преобразовательного трансформатора, так как наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоник тока в трансформаторе. Поэтому требуется устанавливать большую мощность трансформатора. Кроме того, наблюдаются локальные перегревы бака трансформатора.

Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке.

**Батареи конденсаторов.** Дополнительные потери энергии в конденсаторах определяются выражением

$$\delta P = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta p_0 \omega C n U_n^2, \quad (12.7)$$

где  $\Delta p_0$  – удельные потери на основной частоте;  $C$  – емкость конденсатора;  $U_n$  – напряжение  $n$ -й гармоники.

Эти потери приводят к дополнительному нагреву конденсаторов. В общем случае конденсаторы проектируются так, чтобы допускать определенную токовую перегрузку. Конденсаторы, выпускаемые в Великобритании, допускают перегрузку 15, в Европе и Австралии – 30, в США – 80, в РФ – 30%. При превышении этих значений, наблюдающихся в условиях повышенных гармоник напряжения на вводах конденсаторов, последние перегреваются и выходят из строя.

#### 12.3.4. Системы дистанционного управления токами тональной частоты

Такие системы часто используются для дистанционного включения и отключения уличного освещения и для управления нагрузкой (например, бытовыми водонагревателями). Ложная работа такой системы может возникнуть в случае, если в сети имеются гармоники, частоты которых близки к частоте системы управления. Амплитуда гармоники напряжения, которая может привести к срабатыванию реле, зависит от его характеристик (чувствительности и селективности) и близости частот влияющей гармоники и системы управления.

Возможны два вида воздействия:

- а) локировка сигнала, когда гармоническая помеха не позволяет выделить управляющий сигнал (наличие конденсаторов может приводить к такому же результату, благодаря их свойству поглощать напряжение повышенной частоты);
- б) ложная работа реле из-за возникших сетевых гармоник при отсутствии управляющего сигнала.

Ранее выпускавшиеся типы реле были электромеханическими с соответствующими фильтрами высших гармоник. Они были медленнодействующими, но обладали хорошей селективностью. Тем не менее, эти реле ложно срабатывали в связи с низкой степенью кодирования сигнала, позволяющей воздействовать на реле любой гармонике, прошедшей через фильтр.

Новые реле в основном представляют собой электронный эквивалент электромеханических предшественников. Они обычно включают в себя пьезоэлектрические или активные фильтры, а высокая степень кодирования сигнала минимизирует ложные срабатывания.

Цифровые фильтры в системе дистанционного управления обладают почти идеальной способностью выделять сигналы установленной частоты при наличии помех в виде высших гармоник.

### 12.3.5. Устройства релейной защиты в энергосистемах

Гармоники могут нарушать работу устройств защиты или ухудшать их характеристики. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства. Цифровые реле и алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или точки пересечения нуля, особенно чувствительны к гармоникам.

В большинстве случаев изменения характеристик несут существенны. Испытания показали, что большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20%. Однако увеличение доли мощных преобразователей в сетях может в будущем изменить ситуацию.

Проблемы, возникающие из-за гармоник, различны для нормальных и аварийных режимов и ниже рассмотрены отдельно.

**Влияние гармоник в аварийных режимах.** Устройство защиты обычно реагирует на напряжение или ток основной частоты, а все гармоники в переходном режиме либо отфильтровываются, либо не оказывают воздействие на устройство. Последнее характерно для электромеханических реле, особенно используемых в максимальной токовой защите. Эти реле имеют большую инерцию, что делает их практически нечувствительными к высшим гармоникам.

Более существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, основанной на измерении сопротивлений. Дистанционная защита, основанная на измерении сопротивлений на основной частоте, может давать существенные ошибки в случае наличия в токе КЗ высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток КЗ течет через землю (сопротивление земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма велика.

В случае металлического КЗ в токе и напряжении преобладает основная частота. Однако в связи с насыщением трансформатора тока возникает вторичное искажение кривой, особенно в случае большой апериодической составляющей в первичном токе. В этих случаях также возникают проблемы обеспечения нормальной работы защиты.

В установившихся режимах работы нелинейность, связанная с перевозбуждением трансформатора тока, вызывает только гармоники нечетного порядка. В переходных режимах могут возникнуть любые гармоники, наибольшие амплитуды имеют обычно вторая и третья.

Однако все эти проблемы являются проблемами правильного проектирования. Правильный выбор оборудования устраняет множество трудностей, связанных с измерительными трансформаторами.

Фильтрация гармоник, особенно в цифровых защитах, наиболее важна для дистанционных защит. Ряд работ, выполненных в области цифровых способов фильтрации, показал, что хотя алгоритмы такой фильтрации частот достаточно сложны, получение нужного результата не представляет особых трудностей.

**Влияние гармоник на системы защиты в нормальных режимах работы электрических сетей.** Низкая чувствительность устройств защиты к параметрам режима в нормальных условиях обуславливает практическое отсутствие проблем, связанных с гармониками в этих режимах. Исключение составляет проблема, обусловленная включением в сеть мощных трансформаторов, сопровождающимся броском намагничивающего тока. На практике высокое содержание высших гармоник в намагничивающем токе трансформатора в большинстве случаев используется для блокировки отключения выключателей высокого напряжения защитой трансформатора, несмотря на исключительно высокий пик намагничивающего тока.

Амплитуда тока зависит от индуктивности трансформатора, сопротивления обмотки и момента времени, в который происходит включение. Остаточный поток в воздушном зазоре в момент перед включением несколько увеличивает или уменьшает трудности в зависимости от полярности потока по отношению к начальному значению мгновенного напряжения. Так как ток на вторичной стороне во время намагничивания отсутствует, большой первичный ток может вызвать ложное срабатывание дифференциальной защиты.

Наиболее простым способом является использование задержки времени, однако это может привести к серьезному повреждению трансформатора, если авария произойдет во время его включения. На практике нехарактерную для сетей вторую гармонику, присутствующую в токе включения, используют для блокировки защиты, хотя защита остается достаточно чувствительной к внутренним повреждениям трансформатора во время включения.

### 12.3.6. Оборудование потребителей

**Телевизоры.** Гармоники, увеличивающие пик напряжения, могут вызвать искажения изображения и изменение яркости.

**Флюоресцентные и ртутные лампы.** Балластные устройства этих ламп иногда содержат конденсаторы, и при определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

**Компьютеры.** Существуют пределы на допустимые уровни искажений в сетях, питающих компьютеры и системы обработки данных. В некоторых случаях они выражаются в процентах от номинального напряжения (например, для компьютера Honeywell DEC – 3%, IBM – 5%) либо в виде отношения пика напряжения к действующему значению.

**Преобразовательное оборудование.** Провалы на синусоиде напряжения, возникающие во время коммутации вентилей, могут влиять на синхронизацию другого подобного оборудования или устройств, управление которыми осуществляется в момент перехода кривой напряжения нулевого значения.

**Оборудование с регулируемой тиристорами частотой вращения.** Теоретически гармоники могут влиять на такое оборудование несколькими способами:

- а) провалы на синусоиде напряжения вызывают неправильную работу из-за пропусков зажигания тиристором;
- б) гармоники напряжения могут вызвать зажигание не в требуемый момент;
- в) резонанс между различными типами оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин.

Описанные выше воздействия могут ощущаться и другими потребителями, присоединенными к той же сети. Если потребитель не испытывает затруднений с тиристорно

управляемым оборудованием в своих сетях, он вряд ли окажет влияние на других потребителей. Потребители, питающиеся от разных шин, теоретически могут влиять друг на друга, однако электрическая удаленность снижает вероятность такого взаимодействия.

### 12.3.7. Влияние гармоник на измерение мощности и энергии

Измерительные приборы калибруются при чисто синусоидальных токе и напряжении, поэтому при их использовании для измерения мощности при искаженных токах и напряжениях они могут давать погрешности сверх нормированных.

Значение и направление гармонических искажений (вторичной мощности) важны для коммерческих расчетов за электроэнергию, так как знак погрешности определяется направлением вторичной мощности. Исследования показали, что погрешности измерений, вызванной высшими гармониками, варьируется в широких пределах и возможны как положительные, так и отрицательные погрешности.

Наиболее распространенным прибором для измерения энергии является индукционный счетчик электромагнитной системы, вращающие и тормозящие магнитные потоки которой действуют на ротор счетчика, создавая результирующий момент вращения. В счетчике предусмотрены специальные элементы, создающие вторичные потоки и позволяющие увеличить точность измерения и скомпенсировать момент трения регистрирующего механизма. Эти элементы, создающие первичный и вторичный моменты, обычно нелинейны по отношению как к амплитуде, так и к частоте. Нелинейные элементы включают в себя токовые и напряженческие части, перегрузочные магнитные шунты и частотно-чувствительные элементы, такие как диск, квадратурный и антифрикционный контуры.

Восприимчивость счетчика к частотам, находящимся за пределами расчетных параметров, невелика. Выражение для мощности в сети можно записать в следующем виде:

$$P_{\Sigma} = U_{\text{пр}} I_{\text{пр}} + U_1 I_1 \cos \phi_1 + U_r I_r \cos \phi_r = P_{\text{пр}} + P_1 + P_r, \quad (12.8)$$

где  $U_{\text{пр}}$ ,  $I_{\text{пр}}$ ,  $P_{\text{пр}}$  – напряжение, ток и мощность постоянной составляющей;  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$  – то же основной гармоники;  $U_r$ ,  $I_r$ ,  $P_r$  – то же гармонических составляющих.

Счетчик не измеряет  $P_{\text{пр}}$ , но чувствителен к его присутствию, измеряет  $P_1$  с большой точностью и  $P_r$  с гораздо меньшей точностью, зависящей от частоты. Суммарная мощность гармоник получается суммированием всех компонентов с частотами, выше и ниже основной.

Любая постоянная составляющая, поступающая из системы или генерируемая потребителем, вызывает погрешность, пропорциональную отношению  $P_{\text{пр}}/P_{\Sigma}$ . Знак погрешности определяется направлением потока  $P_{\text{пр}}$ . Подобным образом гармонические составляющие вызывают погрешности, определяемые соотношением  $\pm kP_r/P_{\Sigma}$ , где коэффициент  $k$  зависит от амплитудно-частотной характеристики счетчика, а знак определяется направлением потока мощности гармоники.

Составляющие постоянного тока и высших гармоник не могут сами по себе создать момент вращения, но искажают измерение мощности на основной частоте. Постоянный ток нарушает рабочие потоки и изменяет магнитную проницаемость магнитных элементов. Потоки, вызываемые гармониками, взаимодействуют с потоками той же

частоты, возникающими из-за несовершенства элементов конструкции счетчика, и вызывают вторичные моменты.

Исследования показали, что обычно индукционные счетчики завышают мощность, потребляемую преобразователями, на несколько процентов (были отмечены случаи до 6%) в основном вследствие слабого демпфирования в интервалы отсутствия тока. Такие потребители оказываются автоматически наказанными за внесение искажений в сеть, поэтому в их собственных интересах установка соответствующих средств для подавления гармоник. Повышенные показания счетчиков хорошо компенсируют добавочные потери мощности в сети энергосистемы, вызываемые гармониками.

Количественных данных о влиянии гармоник на точность измерения максимума нагрузки нет, однако предположительно оно такое же, как и на точность измерения энергии. Точное измерение энергии независимо от формы кривых тока и напряжения обеспечивается электронными счетчиками, имеющими более высокую стоимость.

Гармоники оказывают воздействие и на точность измерения реактивной мощности, которая точно определена лишь для случая синусоидальных токов и напряжений, и на точность измерения коэффициента мощности.

Редко упоминается влияние гармоник на точность поверки и калибровки приборов в лабораториях, хотя эта сторона вопроса также важна.

### 12.3.8. Влияние гармоник на коэффициент мощности

Мгновенные значения тока и напряжения могут быть выражены в следующем виде:

$$u = \sum_1^n \sqrt{2}U_n \sin(n\omega t + a_n) + \sum_1^m \sqrt{2}U_m \sin(m\omega t + a_m); \quad (12.9)$$

$$i = \sum_1^n \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + a_n + \varphi_n) + \sum_1^p \sqrt{2}I_p \sin(p\omega t + a_p).$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u i dt}{U_n I_n} = \frac{\sum_1^n U_n I_n \cos \varphi_n}{\left[ \left( \sum_1^n U_n^2 + \sum_1^m U_m^2 \right) \left( \sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2 \right) \right]^{1/2}}, \quad (12.10)$$

где  $U_n, I_n$  – действующие значения тока и напряжения.

Коэффициент мощности характеризует полноту использования активной мощности. Низкое его значение говорит о слабом использовании мощности источника.

При синусоидальном напряжении (10.10) приобретает вид

$$\cos \varphi = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{U_1 I_1} = \frac{I_1}{I_1} \cos \varphi_1 = \mu \cos \varphi_1, \quad (10.11)$$

где  $\varphi_1$  – угол сдвига между напряжением и составляющей основной частоты тока;  $\mu$  – коэффициент несинусоидальности тока.

Компенсация реактивной мощности при искаженной форме кривых тока и напряжения встречает затруднения. Так как для компенсации используются устройства, практически не имеющие потерь, минимизация кажущейся мощности должна была бы

вести к оптимальному коэффициенту мощности. Например, если емкость  $C$  присоединить параллельно нагрузке, описываемой выражениями (12.8) и (12.9), общее выражение для кажущейся мощности будет иметь вид

$$S = \left( \sum_1^n U_n^2 + \sum_1^m U_m^2 \right)^{1/2} \times \left[ \sum_1^n (I_n^2 + U_n^2 n^2 \omega^2 C^2 + 2U_n I_n n \omega C \sin \varphi_n) + \sum_1^m U_m^2 m^2 \omega^2 C^2 + \sum_1^p I_p^2 \right]^{1/2}. \quad (12.12)$$

Если взять производную от (10.12) по  $C$  и приравнять ее нулю, то

$$C_{0\text{м}} = \frac{\frac{1}{\omega} \sum_1^n U_n n I_n \sin \varphi_n}{\sum_1^n U_n^2 n^2 + \sum_1^m U_m^2 m^2}. \quad (12.13)$$

Международный комитет по улучшению коэффициента мощности назвал реактивной мощностью составляющую кажущейся мощности, выражаемую как

$$Q = \sum_1^n U_n I_n \sin \varphi_n = \frac{1}{2\pi} \sum_1^n \frac{1}{n} \int_0^T U_n di_n. \quad (12.14)$$

Хотя не был согласован физический смысл этого выражения, оно было принято по двум соображениям:

- 1) сохранения этого выражения в линейных синусоидальных системах;
- 2) возможности представления кажущейся мощности в несинусоидальных системах в виде

$$S = (P^2 + Q^2 + D^2)^{1/2}, \quad (12.15)$$

где  $P$  – средняя мощность;  $D$  – мощность искажения.

Целью компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов является улучшение коэффициента мощности в случае синусоидального напряжения. Улучшение его при наличии гармоник может быть проведено с помощью фильтров высших гармоник, увеличением пульсности преобразователей или изменением кривой тока.

## 12.4. Нормирование гармоник в электрических сетях. Показатели качества электрической энергии

До недавнего времени гармоники в электрических сетях создавали относительно мало проблем, за исключением нескольких специальных случаев, относящихся к тяговым подстанциям железнодорожного транспорта, преобразовательным установкам линий электропередачи высокого напряжения постоянного тока, металлургических и электромеханических заводов. С ростом числа и мощности искажающих нагрузок, присоединенных к электрическим сетям, ситуация изменилась, что повлекло за собой введение в ряде стран стандартов, ограничивающих уровень гармоник в сетях.

Стандарты, относящиеся к гармоникам в сетях, преследуют три цели:

- 1) снижение искажения синусоидальности токов и напряжений до значений, допустимых для электроэнергетических систем, их оборудования и устройств

управления. Особенно уязвимыми в этом отношении являются конденсаторные батареи, системы сигнализации на звуковых частотах (с помощью токов наложенной частоты) и устройства, использующие принцип коммутации в момент перехода напряжения через нуль;

- 2) обеспечение потребителей электроэнергией с уровнем искажения синусоидальности напряжения, допустимым для электрооборудования и устройств, эксплуатируемых в их сетях;
- 3) снижение влияния электроэнергетических систем на другие системы, например телефонные.

Особенности систем электроснабжения в разных странах, например различия в конфигурации сетей, широте использования систем дистанционного управления нагрузкой, в определенной степени влияют на характер стандарта и численные значения норм.

Требования, содержащиеся в стандартах, в значительной степени базируются на опыте работы, определившем предельные уровни гармоник, при которых начинают возникать проблемы, и меры, принимаемые для их решения. В связи с этим стандарты, как правило, основаны на эмпирических данных, они редко базируются на детальном изучении поведения систем при различных уровнях высших гармоник. Это хорошо иллюстрируется рассмотрением ограничений, накладываемых на четные и нечетные гармоники. Характеристики используемого оборудования обусловили тот факт, что четные гармоники в сетях имеют меньшие амплитуды, чем нечетные, которые обусловлены выпрямительным оборудованием. Уровни гармоник, нормированные стандартами, отражают эту ситуацию, устанавливая приблизительно вдвое меньший уровень для четных гармоник.

Дальнейшие ограничения на детализацию требований стандартов накладывались располагаемыми средствами измерения. Относительно неполные данные, обеспечиваемые аналоговыми средствами измерения, заставляли ограничивать число контролируемых параметров, ограничивая, таким образом, и дальнейшее развитие стандартов.

Исходя из изложенного ясно, что любая попытка сравнивать стандарты должна предприниматься с большой осторожностью, так как при разработке каждого стандарта принимался во внимание разный набор факторов. Так как каждый стандарт представляет собой компромисс для конкретной системы между требованиями поддерживать напряжение в сети близким к синусоидальному и возможностями потребителей использовать оборудование, искажающее синусоиду, прямое сравнение стандартов не имеет смысла.

Приведенные соображения не имеют целью доказать, что не существует преимуществ того или другого подхода к разработке стандарта для конкретной системы электроснабжения или что стандарт не может быть улучшен. Следует осознавать, что ни один стандарт, относящийся к содержанию гармоник в системах, не может рассматриваться как неизменный, а должен отражать изменяющееся представление о требованиях системы. По мере того как это представление углубляется в связи с применением новых методов измерения и анализа гармоник, должны меняться и стандарты.

**Факторы, обуславливающие способ нормирования гармоник.** При анализе воздействия гармоник на определенную систему электроснабжения с целью установления обоснованных ограничений необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) гармонический состав тока и напряжения;

- 2) общее содержание гармоник, выражаемое среднеквадратичным их значением либо коэффициентом искажения синусоидальности:

$$K_U = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}, \quad (12.16)$$

где  $U_n$  – напряжение  $n$ -й гармоники;  $U_1$  – напряжение основной частоты;

- 3) номинальное напряжение сети, в которой проводятся измерения. При необходимости надо делать различие между питающими и распределительными сетями;
- 4) некоторые характеристики системы, обуславливающие уровень гармоник. В случае отсутствия подробной информации о сопротивлениях сетей на частотах высших гармоник эти характеристики выражаются через уровень тока (мощности) КЗ в точке общего присоединения;
- 5) вид лимитируемых величин. Нормы могут быть наложены на амплитудное или действующее значение и относиться, в свою очередь, к мгновенному значению, уровню, поддерживаемому в течение установленного периода времени, или к числу случаев нахождения измеряемой величины внутри установленного интервала;
- 6) используемый метод измерения и форма представления данных;
- 7) типы искажающих нагрузок;
- 8) возможное воздействие на коммутации и связанное оборудование, а также использование психометрического коэффициента;
- 9) применение некоторых специальных критериев, например учитывающих возможности использования дистанционного управления.

На практике каждый стандарт представляет собой сочетание перечисленных факторов с индивидуальным весом каждого из них, определяемым условиями электропитания.

Стандарты могут устанавливать допустимые уровни гармоник в сети или условия присоединения к ней оборудования либо представлять собой комбинацию обоих подходов. В стандарте Новой Зеландии, например, основное внимание обращено на допустимые уровни гармоник в сети, а требования к источникам гармоник в части их возможного влияния на содержание гармоник в сети приведены в приложениях. Австралийский стандарт и Инженерные рекомендации Великобритании являются стандартами, определяющими условия присоединения оборудования к сети в различных ситуациях.

Сами нормы могут быть выражены либо в виде абсолютных значений тока или напряжения гармоник, которые не должны превышать, либо в виде допустимой добавки искажений, вносимых источником, с ограниченным рассмотрением общего эффекта. Рекомендации включают в себя оба подхода, так как разрешают присоединение к сети преобразователей определенных типов и мощностей независимо от уже существующего в ней уровня гармоник. Для преобразователей с мощностью, более установленной в стандарте, условия присоединения зависят от существующего в данном узле уровня гармоник.

**Требования, предъявляемые к потребителям.** Способ выражения требований, предъявляемых к потребителям, является важным аспектом стандартов.

Применение норм, выраженных в виде абсолютных значений токов, предоставляет равные права всем потребителям независимо от их мощности. Однако это может оказаться несправедливым по отношению к крупным потребителям, получающим

питание от общей точки с рядом малых потребителей, так как не учитывается разница в доле участия потребителей в общей нагрузке. Если же нормы выражаются способом, учитывающим доленое участие потребителей, они могут оказаться чрезмерно жесткими для сравнительно маломощных потребителей в случае, если крупный потребитель имеет мало искажающих нагрузок.

Если нормы выражаются в виде гармоник напряжения в точке общего присоединения, потребители, присоединяющиеся к точкам с большими значениями мощности КЗ, получают преимущества по сравнению с потребителями, присоединяющимися к точкам с малыми мощностями КЗ. Ориентация на нормы в виде допустимых гармоник напряжения может также приводить к тому, что там, где существующий уровень гармоник высок, новые потребители будут вынуждены устанавливать по требованию энергоснабжающей организации дорогие дополнительные устройства. Этот подход к нормированию выражается принципом «первым пришел – первым обслужен».

**Определение численных значений норм.** Уровень восприимчивости электрического и электронного оборудования к существующим гармоникам обычно неизвестен, и, так как конструируемое оборудование должно рассчитываться на установленные нормы, это может оказаться далеко не лучшим подходом. Однако, обычно, предполагают, что главные проблемы известны: перегрузка конденсаторов, особенно в условиях резонанса, ложная работа некоторых систем дистанционного управления и влияние на коммуникационные цепи, особенно телефонные.

При выборе способа нормирования должны быть приняты во внимание все проблемы, вызываемые разнообразием типов искажающих нагрузок. Некоторые системы электроснабжения содержат большое число искажающих нагрузок малой мощности, другие – крупных потребителей, генерирующих значительные искажения. Разнообразие сочетаний больших и малых нагрузок характерно для систем, находящихся между этими двумя крайними случаями. Первый случай характерен для бытовых электроприемников – от регуляторов освещения до стиральных машин. Общая нагрузка сети формируется большим числом мелких потребителей, каждый из которых вносит свой вклад в суммарные искажения. Генерация гармоник бытовыми электроприемниками нормируется многими стандартами, такими как ГОСТ 30804.3.2–2013, международный стандарт МЭК 61000-3-2:2009.

Промышленные потребители могут иметь в своем составе ряд электроприемников, генерирующих гармоники. Перед такими потребителями встают две проблемы: необходимо, чтобы генерируемые гармоники не нарушали нормальной работы других аппаратов и оборудования в собственной системе электроснабжения и в то же время необходимо поддерживать в точке общего присоединения с другими потребителями предписанный стандартом уровень гармоник. Исследования показали, что во многих случаях, когда наблюдаются большие уровни гармоник во внутризаводских сетях, они не обязательно проникают во внешнюю сеть.

Между крайними случаями существует большое число систем, состоящих из нагрузок, которые хотя и больше нагрузок бытовых электроприемников, все же недостаточно велики, чтобы рассматривать их индивидуально. В этих случаях суммарный уровень искажений не может быть оценен отдельным потребителем и должен оцениваться энергоснабжающей организацией.

Взаимодействие гармоник от нескольких источников обуславливается их случайной природой и особенностями распределения гармоник в системе, как в конкретном режиме ее работы, так и во времени. Резонансные условия и их изменения, связанные с отключением и включением элементов системы, еще более усложняют проблему.

В некоторых стандартах случайный характер гармоник учитывается введением коэффициента одновременности. Суммарная мощность искажающих нагрузок трансформируется в этом случае в эквивалентную мощность, которая и используется в соотношениях, приведенных в стандартах.

**Трудности расчета гармоник.** Теоретически, зная модели всех элементов системы, можно определить уровень гармоник в любой ее точке. На практике такой подход трудно реализовать из-за невозможности точного описания поведения элементов системы на частотах высших гармоник, недостаточно достоверной информации об узловых сопротивлениях системы на этих частотах и проблемах, связанных со случайным характером и особенностями суммирования гармоник от различных источников.

**Национальные стандарты на уровни гармоник.** Ниже описан ряд национальных стандартов, иллюстрирующих разницу в подходах к ограничению гармоник, принятых в различных странах. Все рассмотренные стандарты устанавливают нормы на коэффициент искажения синусоидальности, многие из них содержат нормы и на отдельные гармоники напряжения. Последние выражаются в различных видах: процентного отношения различных гармоник; пределов, покрывающих весь частотный диапазон для четных и нечетных гармоник; абсолютных или относительных (в процентах) норм для каждой гармоники; комбинаций перечисленных способов. Нормируемые уровни обычно зависят от класса напряжения, иногда они различаются для питающих и распределительных систем.

Необычен подход фирмы Электрисите де Франс, определяющий общий уровень искажения напряжения в точке общего присоединения через индивидуальный вклад каждого потребителя в искажение напряжения в этой точке. Нормы установлены для коэффициента искажения синусоидальности напряжения и для уровней четных и нечетных гармоник, вносимых потребителем.

Нормы на гармоники тока устанавливаются несколькими стандартами. Они определяют уровни гармоник тока, которые могут генерироваться или потребляться отдельным потребителем. В стандартах Новой Зеландии (для питающих сетей напряжением 66 кВ и выше) и Великобритании они выражены в виде абсолютных значений. В стандарте Финляндии допустимые уровни гармоник тока приводятся в виде относительных значений (по отношению к максимальной нагрузке).

Так как основным источником гармонических искажений являются статические преобразователи, стандарты обычно устанавливают определенную процедуру для оценки допустимости присоединения к конкретной точке сети рассматриваемого типа преобразователя. Эта процедура может быть основана на принципе «первым пришел – первым обслужен», принятом в Австралии и Великобритании, либо на принципе распределения тем или другим образом между потребителями общего допустимого уровня искажений. Последний принцип используется в Новой Зеландии, где распределение осуществляется пропорционально максимальной мощности и с учетом мощности КЗ в узле.

Мощность и тип преобразователя, который разрешается подключить к сети, определяются либо с помощью таблиц и графиков, либо расчетным путем на основании требований стандарта.

Для того чтобы управлять уровнем гармоник, необходимо производить их измерения. Обычно в стандартах не приводятся методики измерения, хотя в рекомендациях G5/3 Великобритании указываются используемые средства измерения. Исключение составляет новозеландский стандарт, включающий детальную процедуру проведения измерений и устанавливающий спецификацию для средств измерения.

**Нормирование показателей, характеризующих несинусоидальные режимы.** Несинусоидальность напряжения и тока обуславливает дополнительные потери и нагрев, а также ускоренное старение изоляции электрооборудования и, кроме того, отрицательно сказывается на функционировании различных видов электрооборудования. Специфическое воздействие на различные виды электрооборудования, системы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи проявляется дифференцирование и зависит от амплитудного спектра напряжения (тока), параметров электрических сетей и других факторов. Таким образом, в общем случае отсутствует зависимость между энергией гармонической помехи и степенью воздействия ее на электрическую сеть. Это обстоятельство, по-видимому, обусловило широкое применение показателя, характеризующего искажение кривой напряжения сети, называемого коэффициентом несинусоидальности напряжения и определяемого отношением действующего значения напряжения высших гармоник к номинальному или (чаще) первой гармонике напряжения. По этой же причине в различных странах существуют часто значительно отличающиеся друг от друга стандарты (нормы, указания, положения и т. п.), в которых, однако, просматривается тенденция в той или иной мере ограничить несинусоидальность в узлах подключения источников высших гармоник и проникновение их в сети других напряжений. При этом количественные характеристики допустимых значений высших гармоник или мощностей источников определяются главным образом на основании экспертных оценок, с учетом особенностей электрических сетей, линейных и нелинейных нагрузок, преобладающих в данной стране. Строгое обоснование этих характеристик не представляется возможным в силу значительного влияния фактора неопределенности: АЧХ сопротивлений узлов нагрузок и ЭС, изменяющихся значений нелинейных нагрузок и др. Поэтому при разработке соответствующих нормативных документов полезно учитывать стандарты других стран.

Под углом зрения этих соображений рассмотрим подходы к нормированию несинусоидальности, принятые в нормативных документах различных государств. Межгосударственным стандартом ГОСТ 32144–2013 (EN 50160), принятым также в Армении, Белоруссии, Казахстане, Киргизии, Молдове, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане в качестве национальных стандартов, нормируются:

- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $K_{U(n)}$  в процентах напряжения основной гармонической составляющей  $U_1$  в точке передачи электрической энергии;
- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей)  $K_U$ , % в точке передачи электрической энергии.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 12.1, в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Предельно допустимое значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения принимается равным полуторакратному значению по сравнению с приведенным в табл. 12.2.

Расчетное время, в течение которого указанные показатели качества электроэнергии должны соответствовать нормам (см. табл. 12.1 и 12.2), составляет 24 часа.

Указанный стандарт соответствует стандартам МЭК и публикациям МЭК в части уровней ЭМС в системах электроснабжения и методов измерения электромагнитных помех.

**Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{\Sigma}$**

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{\Sigma}$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6–25	35	110–220
12,0	8,0	6,0	3,0

**Нормы гармонических составляющих потребляемого тока в сетях низкого напряжения.** Нормы эмиссии гармонических составляющих тока, потребляемого техническими средствами из сети электропитания, установлены в ГОСТ 30804.3.2–2013. Указанный стандарт, аналогичный международному стандарту МЭК 61000-3-2–2009, распространяется на технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к распределительным электрическим сетям напряжения 220, 380 В частотой 50 Гц. Требования по ограничению эмиссии гармонических составляющих потребляемого тока для других случаев в государственных стандартах не установлены.

Нормирование гармонических составляющих потребляемого тока осуществляется таким образом, чтобы, с учетом допустимой помехоэмиссии от других технических средств, уровни гармонических составляющих напряжения в системах электроснабжения общего назначения не превышали уровней, установленных нормами качества электрической энергии (ГОСТ 32144–2013).

Установление норм гармонических составляющих тока, потребляемого техническими средствами, в целях обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения является новым в отечественной нормативной документации, хотя уже длительное время применяется в развитых странах.

В ГОСТ 30804.3.2–2013 установлены общие конструктивные требования к техническим средствам, направленные на ограничение эмиссии гармонических составляющих потребляемого тока.

**Нормы колебаний напряжения в сети электропитания и фликера, вызываемых техническими средствами** (ГОСТ 30804.3.3–2013). Нормы колебаний напряжения в сети электропитания и фликера, вызываемых техническими средствами, установлены в ГОСТ 30804.3.3–2013, аналогичном международному стандарту МЭК 61000-3-3–2008. Указанный стандарт устанавливает требования к техническим средствам, с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемым к распределительным электрическим сетям при напряжении фаза–нейтраль от 220 до 240 В частотой 50 Гц. Требования и нормы для других случаев в государственных стандартах не установлены.

Нормирование колебаний напряжения и фликера осуществляется таким образом, чтобы с учетом допустимой эмиссии от других технических средств уровни колебаний напряжения и доз фликера в системах электроснабжения общего назначения не превышали уровней, установленных в ГОСТ 32144–2013.

Установление норм колебаний напряжения и фликера, вызываемых техническими средствами, в целях обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения является новым в отечественной нормативной документации, хотя длительное время применяется в развитых странах.

Таблица 12.2

Значения коэффициента  $K_n$   $n$ -й гармонической составляющей напряжения, %

Номер гармоника $n$	Нечетные гармоники, не кратные 3, при $U_{ном}$ , кВ				Нечетные гармоники, кратные 3, при $U_{ном}$ , кВ				Четные гармоники, при $U_{ном}$ , кВ				
	0,38	6-20	35	110-220	0,38	6-20	35	110-220	$n$	0,38	6-20	35	110-220
	5	6,0	4,0	3,0	1,5	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0
7	5,0	3,0	2,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4					12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4					>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4									
>25	1,5	1,0	1,0	0,4									

В ГОСТ Р 30804.3.3–2013 установлены нормы применяемые к колебаниям напряжения и фликеру на портах электропитания технических средств.

**Нормы качества электрической энергии** (ГОСТ 32144–2013). Показатели качества электрической энергии и нормы качества электрической энергии установлены в ГОСТ 32144–2013. Стандарт применяется для электрических сетей систем электропитания общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц и точек общего присоединения (точек, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии, или различные приемники электрической энергии).

ГОСТ 32144–2013 устанавливает следующую номенклатуру показателей качества электроэнергии:

- 1 – медленные изменения напряжения;
- 2 – колебания напряжения и фликер;
- 3 – одиночные быстрые изменения напряжения;
- 4 – несинусоидальность напряжения;
- 5 – гармонические составляющие напряжения;
- 6 – интергармонические составляющие напряжения;
- 7 – несимметрия напряжений в трехфазных системах;
- 8 – прерывания напряжения;
- 9 – провалы напряжения и перенапряжения;
- 10 – импульсные напряжения;
- 11 – напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям.

В ГОСТ 32144–2013 установлены два вида норм качества электроэнергии: нормально допустимые и предельно допустимые. Оценка соответствия качества электрической энергии нормам проводится в течение расчетного периода, равного 24 часам.

Согласно EN 50160, в нормальных режимах в каждые сутки в любом 10-минутном интервале в течение 95 % времени усредненные величины действующих значений высших гармоник напряжения должны быть меньше или равны величинам, приведенным в табл. 12.3. Резонансные явления могут обусловить появление больших величин отдельных гармоник, однако  $K_u$  питающего напряжения, с учетом всех гармоник до 40-го порядка включительно, должен быть меньше либо равен 8 %.

Таблица 12.3

### Допустимые значения напряжений высших гармоник

Номер гармоник некратных трем	Напряжение, %	Номер гармоник, кратных трем	Напряжение, %	Номер четных гармоник	Напряжение, %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5		
11	3,5	15	0,5	4	1
13	3	21	0,5	6–24	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

В документе отмечено, что величины напряжений высших гармоник порядков  $n > 25$  не приведены, поскольку они обычно малы и их прогнозирование весьма затруднено в связи с резонансными явлениями. Нормы EN 50160 разработаны для сетей низкого напряжения – трехпроводных сетей 230 В и сетей среднего напряжения 1–35 кВ.

В рассматриваемом документе отмечено возрастание уровней интергармоник как следствие расширения использования преобразователей частоты и подобных устройств. Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении.

С 1994 г. стандарт EN 50160 имеет статус национальных норм; эти нормы приняты также (с 15.06.1995 г.) в качестве национального стандарта Норвегии. В Дании также приняты нормы EN 50160, однако усредненные значения напряжения высших гармоник в десятиминутных интервалах не должны превосходить приведенных в табл. 12.3 значений, без учета допустимого уменьшения на 5 %. EN 50160 приняты также в качестве польского стандарта.

*Американский стандарт IEEEStd 519* разработан национальным институтом стандартизации (ANSI) и институтом инженеров электриков и электронщиков (IEEE). Кроме собственно стандарта представлены также руководство для пользования и рекомендации для практики.

Стандарт включает в себя таблицы предельно допустимых значений  $K_n$  высших гармоник тока, генерируемых потребителями распределительных сетей (табл. 12.4), сетей среднего (69–161 кВ) и высшего (161 кВ и более) напряжений (табл. 12.5 и 12.6), а также предельно допустимых искажений напряжения (табл. 12.7).

Таблица 12.4

**Максимально допустимые величины тока нечетных гармоник  
в процентах от тока нагрузки  $I_L$  в распределительных сетях**

$I_n/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	$K_n$
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20–50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50–100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100–1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
21 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Таблица 12.5

**Максимально допустимые величины нечетных ВГ  
в процентах от тока нагрузки  $I_L$  при  $U = 69–161$  кВ**

$I_n/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	$K_n$
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	1,5
20–50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50–100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100–1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Таблица 12.6

**Максимально допустимые величины тока нечетных гармоник  
в процентах от тока нагрузки  $I_L$  при  $U > 161$  кВ**

$I_n/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	$K_n$
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Таблица 12.7

**Предельно допустимые искажения напряжения**

Напряжение энергосистем, кВ	Величины напряжения отдельных высших гармоник, %	$K_n$
$\leq 69$	3,0	5,0
69–151	1,5	2,5
$> 161$	1,0	1,5

В рассматриваемом документе отмечается, что в кратковременном режиме (например, в пусковых режимах) допустимые значения тока высших гармоник, приведенные в табл. 12.4, могут быть увеличены на 50 %. В равной мере это относится и к характеристике несинусоидальности напряжения. При наличии в сети выпрямительных преобразователей допустимые уровни основных высших гармоник тока могут быть увеличены в  $q/6$  раз, где  $q$  – пульсность преобразователя (например, для 12-пульсного преобразователя допускается увеличение в 2 раза допустимых значений тока 11; 13; 23 и 25-й гармоник и т.д.). Допустимые уровни тока остальных гармоник могут быть увеличены на 25 %.

*Австралийский стандарт (AS 2279.2)* в разделе, относящемся к электрооборудованию промышленности, имеет три части. Первая и третья части определяют возможность и порядок подключения электрооборудования к сети. Во второй части даны нормы, определяющие допустимые значения напряжения отдельных высших гармоник и  $K_n$  (табл. 12.8).

Таблица 12.8

**Допустимые значения напряжений высших гармоник  
в различных сетях**

Тип электрической сети	Напряжение в узле сети, кВ	$K_n$	Уровни напряжения высших гармоник, %	
			Нечетные	Четные
Распределительная	< 33	5	4	2
Питающая	22, 33 и 66	3	2	1
Системообразующая	$\geq 100$	1,5	1	0,5

Допускаются кратковременные повышения уровней напряжений высших гармоник длительностью до 2 с при интервале между ними не менее 30 с.

Примером ведомственных норм может служить стандарт, выпущенный министерством международной торговли и промышленности Японии. Он основан на стандартах МЭК. В табл. 12.9 представлены требования по ограничению высших гармоник тока крупных потребителей (мА/кВт).

Таблица 12.9

**Предельные значения токов высших гармоник**

Напряжение сети, кВ	Номер гармоники							
	5	7	11	13	17	19	23	> 23
6,6	3,5	2,5	1,6	1,3	1,0	0,9	0,76	0,70
22	1,8	1,3	0,82	0,69	0,53	0,47	0,39	0,36
33	1,2	0,86	0,55	0,46	0,35	0,32	0,26	0,24
66	0,59	0,42	0,27	0,23	0,17	0,16	0,13	0,12
77								
0,50	0,36	0,23	0,19	0,15	0,13	0,11	0,10	
110	0,35	0,25	0,16	0,13	0,10	0,09	0,07	0,07
154	0,25	0,18	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05
220	0,17	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
275	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02

Потребители обязаны снижать уровни высших гармоник тока ниже указанных значений за свой счет.

Стандарт ЮАР (ESKOM) основан на стандартах МЭК с учетом условий эксплуатации энергосистем в Южной Африке и распространяется на сети напряжением 1,1–44 кВ. Допустимое значение  $K_n$  составляет 5 %, каждой из четных высших гармоник порядков  $n < 14$  составляет 4 %, нечетных – 2 %. Величины напряжений (токов) гармоник 14–25-го порядков не должны превосходить половины значений при  $n < 13$ , выше 25-го – 0,25 % этих значений. В этом стандарте указан допустимый уровень напряжения интергармоник, равный 1 %.

МЭК разработан ряд стандартов, нормирующих уровни токов (напряжений) высших гармоник в электрических сетях бытового назначения, а также в промышленных сетях. Стандарт МЭК 1000-2-4 относится к сетям низшего и среднего напряжения; допустимые уровни напряжений (токов) высших гармоник определены в зависимости от класса электрической сети; различают три класса.

Первый класс – электрические сети с оборудованием, весьма чувствительным к различного рода неполадкам (например, фильтро-компенсирующее устройство, батарея конденсаторов и т.д.).

Второй класс относится к узлам питания со стороны ЭЭС и узлам внутризаводской сети.

Третий класс относится только к внутризаводским сетям с ВП.

Допустимые значения  $K_{\text{н}}$  для сетей первого класса составляет 5 %, для второго – 8 % и третьего – 10 %.

В стандарте не указаны допустимые значения токов высших гармоник. Стандарт не распространяется на электрические сети высокого напряжения.

Измерены параметры несинусоидального режима в распределительной сети 11 кВ промышленного предприятия и оценены уровни напряжений (токов) высших гармоник с точки зрения допустимости их по стандартам AIEE Std 519, 1000-2-4 и ESCOM. Сделан вывод, что стандарты адекватны несмотря на различие подходов к нормированию несинусоидальности, и их применение на практике дает сходные результаты.

В Швеции, принимавшей активное участие в разработке стандарта EN 5 0160, тем не менее, продолжается использование установленного ранее стандарта SS 4211811. Согласно этому стандарту, допускается значение  $K_{\text{н}} = 6\%$  с учетом всех высших гармоник, для каждой из нечетных – 4 % и четных – 1 % в течение десятиминутного интервала времени в любые сутки. Ограничивается также уровень интергармоник значением 0,3 % в течение 10-минутного интервала.

Влияние ВГ на силовые установки, системы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Высшие гармоники в СЭС, как уже отмечалось ранее, нежелательны по ряду причин: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики и связи.

При работе асинхронного электродвигателя в условиях несинусоидального напряжения несколько снижаются его коэффициент мощности и вращающий момент на валу. Так, например, если амплитуды 5-й и 7-й гармоник напряжения составляют соответственно 20 и 15 % амплитуды 1-й гармоники, то коэффициент мощности двигателя уменьшается на 2,6 % по сравнению с его значением при синусоидальном напряжении. В условиях промышленных предприятий искажения напряжения, как правило, бывают меньшими, поэтому влияние высших гармоник на коэффициент мощности асинхронного электродвигателя можно не учитывать.

Моменты, развиваемые высшими гармониками тока, также очень малы. Для асинхронного двигателя средней мощности при удельном весе этой гармоники напряжения, равном 20 % основной, момент, обусловленный 5-й гармоникой, не превосходит 0,1 % момента, развиваемого током промышленной частоты.

Искажение формы кривой напряжения заметно сказывается на возникновении и протекании ионизационных процессов в изоляции электрических машин и трансформаторов. При наличии газовых включений в изоляции в них возникают частичные разряды, образуются объемные заряды и происходит последующая их нейтрализация. Нейтрализация зарядов связана с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействие на окружающий диэлектрик; в результате развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и, в конечном счете, к сокращению срока службы изоляции.

Подробные многолетние исследования форм кривых напряжения в сетях электрооборудования предприятий показывают, что во многих случаях за счет высших гармоник кривые напряжения принимают более заостренную форму по сравнению с синусоидальной, поэтому наличие высших гармоник в этих сетях приводит к ускоренному старению изоляции электрических машин и трансформаторов.

При наличии высших гармоник в кривой напряжения процесс старения диэлектрика конденсаторов протекает также более интенсивно, чем в случае, когда конденсаторы работают при синусоидальном напряжении. Это объясняется тем, что физико-химические процессы в диэлектриках, обуславливающие их старение, значительно ускоряются при высоких частотах. Аналогично влияет дополнительный нагрев, вызванный протеканием высших гармоник тока.

В результате длительного (4,5 года) наблюдения за работой батарей конденсаторов с изоляцией, пропитанной минеральным маслом, при стабильных условиях эксплуатации было установлено, что при  $K_{\text{н}} = 5\%$  через 2 года эксплуатации  $\text{tg } \delta$  конденсаторов увеличивается в 2 раза.

Как известно, конденсаторы могут длительно работать при перегрузке их токами высших гармоник не более чем на 30%; допустимое повышение напряжения составляет 10%. Однако при длительной эксплуатации конденсаторов в этих условиях срок службы их сокращается. В условиях промышленных предприятий, как правило, батареи конденсаторов периодически оказываются в режиме, близком к резонансу токов на частоте какой-либо из высших гармоник. Вследствие систематических перегрузок они быстро выходят из строя.

Во многих странах Западной Европы используются конденсаторы, выпускаемые фирмой Мерлен-Жерен (Merlin-Gerin). В качестве диэлектрика применяется полипропилен. Режим работы этих конденсаторов при напряжении  $1,1U_{\text{ном}}$  и токе  $1,3I_{\text{ном}}$  как при наличии высших гармоник, так и при их отсутствии, считается нормальным, поскольку соответствующие запасы заложены в конструкции конденсаторов. Поэтому специальные фильтровые конденсаторы не производятся. Опыт эксплуатации конденсаторов в течение гарантированного времени надежной работы (ресурса) подтвердил их высокие эксплуатационные качества.

## 12.5. Ограничение уровней гармоник напряжений и токов

В электрических системах фильтры применяются, прежде всего для того, чтобы уменьшить амплитуду токов или напряжений одной или нескольких фиксированных частот (параллельные фильтры).

Когда же необходимо избежать проникновения токов определенной частоты в отдельные узлы преобразовательной подстанции или части энергетической системы (как, например, в случае пульсации управляющих сигналов), можно использовать последовательный фильтр, состоящий из параллельно включенных конденсатора и катушки индуктивности, создающих большое сопротивление протеканию тока на выбранной частоте. Однако такое решение не может быть применено для ограничения уровня напряжений гармоник самого источника, поскольку генерация гармоник нелинейными элементами подстанции (например, трансформаторами и статическими преобразователями) является неотъемлемой чертой их нормальной работы.

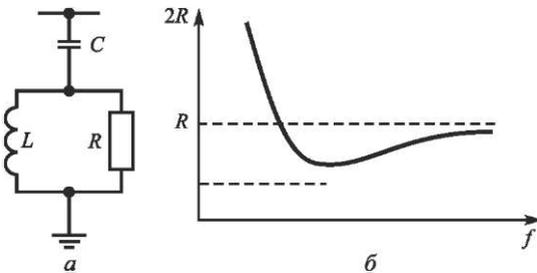
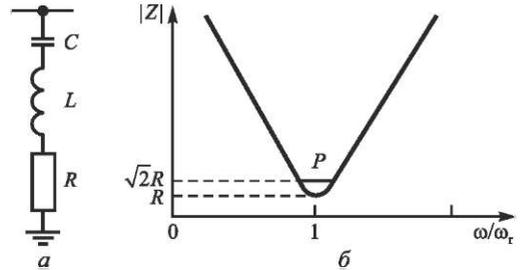
Что касается самих статических преобразователей, то обычно в них приняты меры к ограничению проникновения гармоник тока в систему с помощью создания короткозамкнутого пути с малым сопротивлением для гармонических частот. В принципе возможно создание комбинированных последовательных и параллельных фильтров для минимизации тока и напряжения гармоник, однако для этого необходимы большие затраты.

**Фильтры.** Параллельный фильтр настроен на определенную частоту, если на этой частоте его индуктивное и емкостное сопротивления равны.

Добротность фильтра  $Q$  определяет точность его настройки. Фильтр с высокой добротностью (от 30 до 60) настраивается строго на одну из гармонических частот (например, пятую). Фильтр же с низкой добротностью имеет малое сопротивление в широком диапазоне частот, особенно в случае, если его уровень добротности не превышает 5.

Если такой фильтр используется для подавления гармоник высоких порядков (например, свыше 17-й), то его можно рассматривать и как фильтр верхних частот. На рис. 12.7 и 12.8 представлены основные схемы фильтров и соответствующие зависимости сопротивления от частоты.

**Рис. 12.7.** Схема параллельного фильтра, настроенного на одну частоту (а) и зависимость его полного сопротивления  $Z$  от частоты (б)



**Рис. 12.8.** Схема параллельного фильтра второго порядка подавления частот (а) и зависимость его полного сопротивления  $R$  от частоты (б)

Для настроенного фильтра  $Q$  определяется как отношение индуктивного (или емкостного) сопротивления при резонансе к активному сопротивлению:

$$Q = X_0/R. \quad (12.17)$$

Как показано на рис. 12.7б полоса пропускания частот фильтра  $P$  ограничена частотой, на которой реактивное сопротивление фильтра равно его активному сопротивлению (т.е. угол полного сопротивления равен  $45^\circ$ ), и частотой, на которой модуль полного сопротивления равен  $\sqrt{2} R$ . Добротность фильтра связана с шириной его полосы пропускания следующим соотношением:

$$Q = \omega_n/P, \quad (12.18)$$

где  $\omega_n$  – настроенная угловая частота, рад/с.

Точность настройки фильтра подавления высоких частот обратна добротности настроенных фильтров.

Степень несоответствия настройки фильтра номинальной настроенной частоте характеризуется коэффициентом  $\delta$ , учитывающим изменения основной (питающей) частоты, изменения емкости и индуктивности фильтра, вызываемые старением деталей фильтра и колебаниями температуры, а также собственную расстройку фильтра, связанную с промышленными допусками при его изготовлении и конечностью шагов настройки.

Общая расстройка фильтра на единицу номинальной настроенной

$$\delta = (\omega - \omega_n)/\omega_n. \quad (12.19)$$

Кроме того, изменение  $L$  или  $C$ , скажем, на 2 % вызывает такую же расстройку фильтра, как и изменение частоты системы на 1 %. Следовательно,  $\delta$  можно представить и в виде

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right). \quad (12.20)$$

Мощность фильтра определяется по реактивной мощности, генерируемой фильтром на основной частоте. Эта мощность почти в точности равна реактивной мощности основной частоты, генерируемой конденсаторами. Суммарная же мощность ветвей фильтра определяется требованиями по реактивной мощности, предъявляемыми к источнику гармоник, и тем, в какой степени эти требования могут быть удовлетворены за счет сети переменного тока.

Идеальным критерием разработки фильтра является подавление всех искажений формы напряжения, в том числе и телефонных помех, являющихся самыми сложными для подавления. Однако идеальный критерий нереален как с технической, так и с экономической стороны. С технической точки зрения очень трудно предварительно оценить проникновение гармоник в сеть переменного тока. С экономической стороны уменьшение телефонных помех может быть получено с меньшими затратами, если принять некоторые предварительные меры в телефонных системах и в энергетической системе в целом.

Более реальный критерий предполагает уменьшение искажений до допустимого уровня в точке общего соединения нескольких потребителей и использует или гармонический ток, или гармоническое напряжение, или то и другое. Критерий, основанный на гармониках напряжения, более удобен для разработки фильтров, так как сопротивление сети переменного тока постоянно меняется и проще гарантировать работу фильтра в определенном диапазоне напряжений, чем значение рабочего тока.

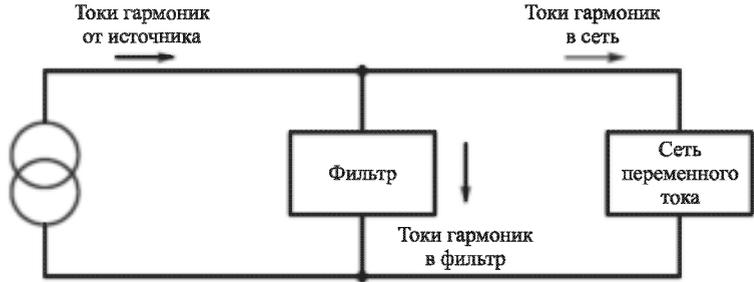
Для того чтобы учесть требуемые гармонические ограничения, при разработке фильтров необходимо следовать следующей схеме:

- 1) в цепь, состоящую из фильтров, параллельно соединенных с электрической системой переменного тока (рис. 12.9) вводится спектр гармоник тока, генерируемый нелинейной нагрузкой на соответствующих частотах, и рассчитываются гармоники напряжения;
- 2) результаты, полученные после выполнения предыдущего пункта, используются для определения других характеристик, таких как искажение напряжения, коэффициенты влияния на линии связи и другие;
- 3) рассчитываются напряжения на элементах фильтра (конденсаторах, катушках индуктивности, резисторах) и их параметры и потери энергии в них.

Особое внимание при разработке фильтров требуется уделить трем элементам: источнику тока, проводимостям фильтра и системы.

В зависимости от нагрузки, а для случая статического преобразователя и от углов зажигания, будет меняться характеристика источника тока. После того как будут изучены проводимости фильтра и системы, потребуется рассчитать для каждой частоты минимальное значение общей эквивалентной проводимости, дающей максимальное искажение напряжения.

Рис. 12.9. Схема определения коэффициента искажения напряжения



Определив схему соединения конкретного фильтра, можно построить геометрическое место точек, соответствующее сопротивлению (проводимости) фильтра. Гораздо труднее построить кривую, соответствующую сопротивлению источника тока даже с малой точностью.

Разработанный фильтр представляет собой однополюсную схему, способную гасить весь спектр пропускаемых гармоник (например, для случая шестипульсного преобразователя гармоники, начиная с пятой). Однако требуемая для осуществления этой цели емкость фильтра очень велика, и гораздо экономичнее подавлять гармоники малых порядков с помощью одноплечевого настроенного фильтра.

*Настроенные фильтры.* Фильтр одной частоты представляет собой последовательную  $RLC$ -цепочку (см. рис. 12.7а), настроенную на частоту одной гармоники (обычно характеристической гармоники малого порядка). Полное сопротивление такого фильтра

$$Z_{\nu} = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (12.21)$$

на резонансной частоте  $f_n$  уменьшается до чисто активного сопротивления  $R$ . Прежде чем перейти к выбору значений  $R$ ,  $L$  и  $C$ , необходимо рассмотреть два основных параметра, характеризующих фильтр – его добротность  $Q$  и относительное отклонение частоты  $\delta$ , определения которых были даны ранее.

Для того чтобы выразить полное сопротивление фильтра через  $Q$  и  $\delta$ , установим следующие соотношения:

$$\omega = \omega_n (1 + \delta); \quad (12.22)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (12.23)$$

где  $\omega_n$  – угловая частота настройки;

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (12.24)$$

где  $X_0$  – реактивное сопротивление конденсатора или катушки индуктивности на резонансной частоте;

$$Q = \frac{X_0}{R}; \quad (12.25)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n R Q}; \quad (12.26)$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n}. \quad (12.27)$$

Подставляя (12.22), (12.26), (12.27) в (12.21), получаем

$$Z_{\phi} = R \left[ 1 + j Q \delta \left( \frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right], \quad (12.28)$$

или, учитывая, что  $\delta$  мало по сравнению с единицей,

$$Z_{\phi} \approx R(1 + j2\delta Q) = X_0(Q^{-1} + j2\delta) \quad (12.29)$$

и

$$|Z_{\phi}| \approx R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2}. \quad (12.30)$$

При разработке фильтров более удобно иметь дело не с полными сопротивлениями, а с полными проводимостями:

$$Y_{\phi} \approx \frac{1}{R(1 + j2\delta Q)} = G_{\phi} + jB_{\phi}, \quad (12.31)$$

где

$$G_{\phi} = \frac{Q}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)}; \quad (12.32)$$

$$B_{\phi} = \frac{2\delta Q^2}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)}; \quad (12.33)$$

Гармоника напряжения на зажимах фильтра

$$U_n = \frac{I_n}{Y_{n0} + Y_{Cn}} = \frac{I_n}{Y_n}, \quad (12.34)$$

следовательно, для того чтобы уменьшить искажение напряжения, необходимо увеличить суммарную проводимость цепи. В системе переменного тока для этого может служить параллельно присоединенный фильтр.

Для оценки максимального значения  $U_n$  необходимо установить предельные значения величин, истинное значение которых точно не известны: отклонение  $\delta$  частоты и полная проводимость сети  $Y_{Cn}$ . Так как с ростом  $\delta$  напряжение гармоники увеличивается, то для анализа работы фильтра должно использоваться наибольшее ожидаемое значение отклонения частоты  $\delta_m$ . К тому же необходимо учесть наихудшие характеристики системы – наименьшую полную проводимость.

На основании этих предельных значений разработчик может определить  $Q$  и мощность фильтра на основной частоте.

Используя  $Q$  и  $\delta$ , уравнение (12.34) можно переписать в виде

$$|U_n| = I_n \left\{ \left[ G_{Cn} + \frac{1}{R(1 + 4\delta^2 Q^2)} \right]^2 + \left[ B_{Cn} - \frac{2\delta Q}{R(1 + 4\delta^2 Q^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2}. \quad (12.35)$$

Анализируя годографы полных сопротивлений, можно показать, что гармонические полные сопротивления в системе координат  $R, jX$  располагаются в области, ограниченной двумя прямыми линиями и окружностью, проходящей через начало координат. Максимальный фазовый угол полного сопротивления сети может быть ограничен  $90^\circ$  и обычно уменьшается с увеличением частоты (кроме случая кабельных сетей при высоких частотах). Наибольшее напряжение гармоники можно получить, используя  $\phi_{Cn}$  со знаком, обратным знаку  $\delta$ .

Уравнение (12.34) приобретает вид для  $\varphi_{C_n}$ , взятого с положительным знаком, а  $\delta$  – с отрицательным:

$$|U_n| = I_n \{ (|Y_{C_n}| \cos \varphi_{C_n} + G_\phi)^2 + (-|Y_{C_n}| \sin \varphi_{C_n} + B_\phi)^2 \}^{-1/2} \quad (12.36)$$

Поскольку значение  $|Y_{C_n}|$  не ограничено, то полная проводимость, дающая максимальное напряжение  $|U_n|$ ,

$$|Y_n| = \frac{\cos \varphi_{C_n} (2Q\delta \operatorname{tg} \varphi_{C_n} - 1)}{R(1 + 4Q^2\delta^2)}, \quad (12.37)$$

а ей соответствует

$$|U_n| = I_n \omega_n L \left[ \frac{1 + 4Q^2\delta^2}{Q(\sin \varphi_{C_n} + 2Q\delta \cos \varphi_{C_n})} \right]. \quad (12.38)$$

Оптимальное значение

$$Q = \frac{1 + \cos \varphi_{C_n}}{2\delta \sin \varphi_{C_n}} \quad (12.39)$$

определяет наименьшее значение напряжения гармоники

$$|U_n| = I_n \delta \omega_n L \left( \frac{4}{1 + \cos \varphi_{C_n}} \right) = \frac{2I_n R}{\sin \varphi_{C_n}}. \quad (12.40)$$

Однако фильтры не всегда проектируются для обеспечения минимума напряжения соответствующей частоты. Обычно максимальное значение  $Q$  выбирается с учетом использования фильтра для снижения потерь энергии.

При расчете фильтра необходимо учитывать и возможность выхода из строя одной или нескольких фильтровых ветвей. При этом оставшиеся ветви фильтра могут оказаться перегруженными, так как вынуждены будут пропускать все токи гармоник, генерируемые преобразователем.

**Фильтры двойной настройки.** Эквивалентные сопротивления двух одночастотных фильтров (рис. 12.10а) в районе их резонансных частот практически равны сопротивлениям схемы фильтров, настроенной на две частоты (рис. 12.10б), при условии, что

$$C_1 = C_a + C_b; \quad (12.41)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2}; \quad (12.42)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b}; \quad (12.43)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}; \quad (12.44)$$

$$R_2 = R_c \left[ \frac{a^2 (1 - x^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + R_b \left[ \frac{(1 - x^2)(1 - ax^2)}{(1 + x^2)(1 + ax^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{(1 - x^2)(1 - ax^2)}{(1 + x^2)(1 + ax^2)} \right], \quad (12.45)$$

где

$$a = \frac{C_a}{C_b} \quad \text{и} \quad x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}}.$$

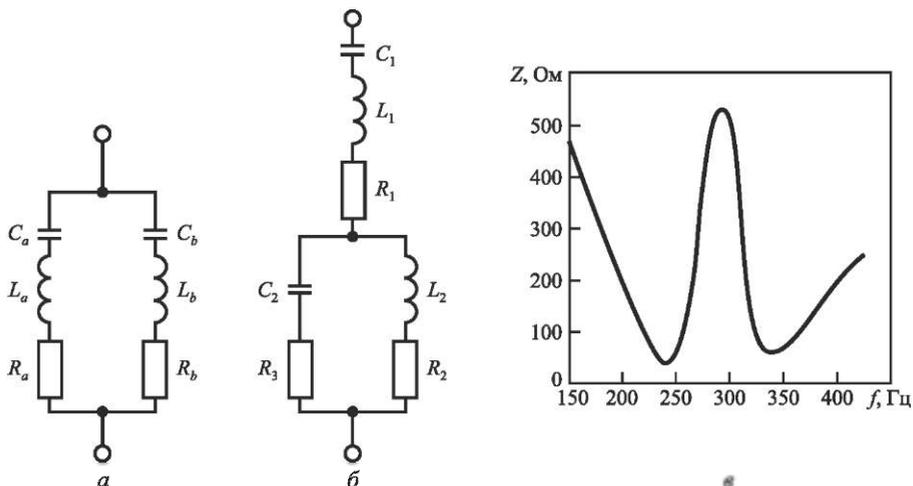


Рис. 12.10. Одночастотный фильтр (а), фильтр двойной настройки (б) и расчетная зависимость сопротивления от частоты фильтра пятой и седьмой гармоник на подстанции Эчинген (в)

Равенство сопротивлений достигается с помощью добавочного сопротивления  $R_1$ , которое определяется минимальным активным сопротивлением катушки  $L_1$ . Эта схема имеет преимущество по сравнению с одночастотными фильтровыми схемами, так как позволяет существенно снизить потери энергии на основной частоте. Основным же достоинством фильтра, настроенного на две частоты, является большее рабочее напряжение. Это связано с тем, что можно уменьшить число катушек индуктивностей, находящихся под полным линейным напряжением.

В качестве примера на рис. 12.10в приведены эквивалентные сопротивления фильтров с двойной настройкой, используемых на подстанции Эчинген передачи энергии через Ла-Манш.

В принципе возможно создание фильтров, настроенных на три и четыре частоты, но в этом редко бывает необходимость, так как подобные фильтры требуют сложной настройки.

**Фильтры с автоматической настройкой.** При разработке настроенных фильтров желательно уменьшить максимальное отклонение частоты. Этого можно добиться применяя настройку фильтра с помощью автоматического регулирования емкости или изменения индуктивности. Обычно считается приемлемой регулировка  $\pm 5\%$ . В преобразователях постоянного тока использовалась система управления, измеряющая реактивную мощность гармонической частоты в фильтре и изменяющая значение  $L$  или  $C$  в зависимости от ее знака и значения.

По сравнению с фильтрами с фиксированной настройкой автоматически настраиваемые фильтры имеют ряд преимуществ:

- 1) имеют меньшую емкость конденсаторов;
- 2) применяемые конденсаторы могут иметь одновременно и большой температурный коэффициент емкости, и большую реактивную мощность в расчете на единицу массы и единицу стоимости;
- 3) из-за большой добротности потери мощности меньше. Преимущества 1 и 2 позволяют снизить стоимость конденсаторов – наиболее дорогих элементов фильтра. Преимущество 2 снижает стоимость резисторов и стоимость потерянной энергии.

**Широкополосные фильтры.** Широкополосный фильтр имеет следующие достоинства:

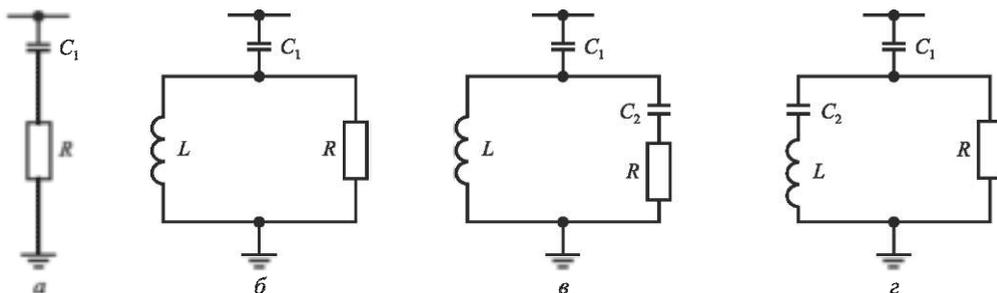
- 1) меньшая чувствительность к изменениям температуры, отклонениям частоты, промышленным допускам при изготовлении элементов, потерям в емкостных элементах и т.п.;
- 2) малое сопротивление широкому спектру гармоник, отсутствие необходимости разбивки фильтра на параллельные ветви, вызывающей затруднения при переключениях и обслуживании;
- 3) удобство применения в случае, если использование настроенных фильтров вызывает появление резонанса токов между проводимостями фильтра и системы на частотах гармоник, меньших нижней частоты настроенного фильтра, или на частотах гармоник, лежащих между настроенными частотами.

Основными недостатками широкополосных фильтров являются:

- 1) для получения одинакового уровня фильтрации широкополосные фильтры должны быть рассчитаны на более высокую мощность, хотя в большинстве случаев хорошая работа фильтра осуществляется в диапазоне, требующемся для регулировки коэффициента мощности;
- 2) потери энергии в резисторе и в катушке индуктивности гораздо выше.

**Типы широкополосных фильтров.** На рис. 12.11 показаны четыре типа гасящих фильтров: первого, второго, третьего порядков и  $C$ -типа.

Фильтр первого порядка применяется редко, так как для него требуется конденсатор большой мощности, а потери на основной частоте велики.



**Рис. 12.11. Широкополосные высокочастотные фильтры:**

$a$  – первого порядка;  $b$  – второго порядка;  $v$  – третьего порядка;  $z$  –  $C$ -типа

Фильтр второго порядка удобен в эксплуатации, но потери на основной частоте по сравнению с фильтром третьего порядка велики.

Основным достоинством фильтра третьего порядка являются его малые потери энергии на основной частоте (по сравнению с фильтром второго порядка), связанные с увеличением полного сопротивления на этой частоте, вызванным наличием конденсатора  $C_2$ . Емкость  $C_2$  много меньше емкости  $C_1$ . По своей работе фильтр  $C$ -типа занимает положение между фильтрами второго и третьего порядка. Основным его преимуществом является существенно меньшие потери на основной частоте из-за того, что на этой частоте  $C_2$  и  $L$  последовательно настроены. Такие фильтры наиболее чувствительны к изменениям основной частоты и отклонениям параметров элементов.

**Схемы фильтров.** Обычно мощные статические преобразователи проектируются на работу по крайней мере с 12-пульсным циклом. Однако очень часто по условиям

эксплуатации или из-за временных сбоев в работе допускается 6-пульсная работа преобразователя. В этих условиях преобразователь генерирует дополнительно к характеристическим гармоникам 12-пульсного режима гармоники пятого и седьмого порядка. Эти гармоники отфильтровываются с помощью специальной схемы, состоящей из настроенных фильтров для гармоник малых порядков (5, 7, 11 и 13-го) и высокочастотного гасящего фильтра для гармоник 17-го и более высоких порядков, рис. 12.12.

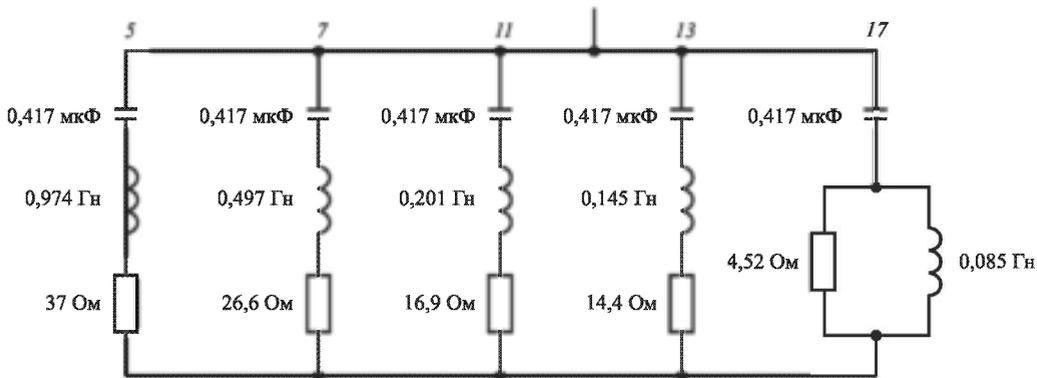


Рис. 12.12. Фильтр переменного тока

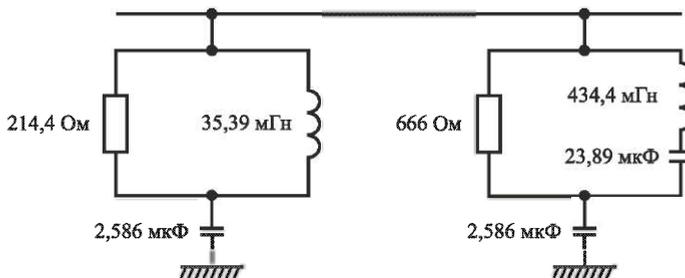


Рис. 12.13. Смешанный фильтр второго порядка и C-типа

**Полосовая фильтрация для 12-пульсных преобразователей.** Установка на преобразовательной подстанции настроенных фильтров резонанса напряжений для 11-й и 13-й гармоник и высокочастотных фильтров для гармоник более высоких порядков обычно приводит к более сильному, чем это требуется, подавлению гармоник.

Это связано с тем, что минимальная мощность фильтра обычно определяется наименьшей емкостью конденсаторов, допустимой с точки зрения экономики, и минимальной реактивной мощностью, генерируемой преобразователем.

Таким образом, схема фильтрации может быть упрощена либо заменой настроенных фильтров 11-й и 13-й гармоник на один гасящий фильтр, либо заменой на такой фильтр всех фильтров схемы. В первом случае гасящий фильтр, заменяющий два настроенных фильтра, должен быть настроен приблизительно на 12-ю гармонику, при этом его добротность будет достаточно большой (20–50), в то время как добротность гасящего фильтра высших гармоник гораздо меньшей (2–4). Во втором случае гасящий фильтр также настраивается на 12-ю гармонику, но для обеспечения достаточно низкого сопротивления для больших гармоник добротность выбирается относительно малой (2–6).

В создаваемых в настоящее время мощных преобразовательных схемах высокого напряжения велика вероятность резонанса гармоник малых порядков между полным сопротивлением системы и емкостным сопротивлением фильтра.

В зависимости от того, что является источником гармоник малых порядков – система переменного тока или преобразователь, могут наблюдаться резонанс напряжений и резонанс токов. Из-за несимметрии системы преобразователь генерирует существенную третью гармонику тока. Эти гармоники имеют прямую последовательность чередования фаз и, следовательно, не поглощаются обмоткой трансформатора, соединенной в треугольник.

Для исключения появления резонанса на малых частотах была предложена другая схема фильтрации, состоящая из фильтра С-типа и фильтра второго порядка (рис. 12.13).

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Дайте определение понятию качество электроэнергии.
2. В чем состоит проблема искажения кривых тока и напряжения в сети?
3. Почему большое внимание уделяется гармоническим составляющим в кривых тока и напряжения?
4. Каким образом развивается параллельный и последовательный резонансы в сетях и как они проявляются в системах электроснабжения?
5. Опишите влияние гармоник на вращающиеся машины и статическое оборудование (ВЛ, трансформаторы, батареи конденсаторов).
6. Как влияют гармоники на работу устройств релейной защиты?
7. Объясните роль статических преобразователей в ухудшении качества электроэнергии.
8. Каково влияние гармоник на измерение мощности и энергии?
9. Каково влияние гармоник на коэффициент мощности?
10. Какие провалы, перерывы напряжений в сетях электроснабжения допустимы?
11. Как осуществляется нормирование гармоник в сетях различных стран?
12. Каковы нормы качества электроэнергии?
13. Каковы способы ограничения уровней гармоник напряжений и токов?
14. Каково назначение и принцип действия настроенных фильтров?
15. Что такое фильтры двойной настройки?
16. Назовите типы широкополосных фильтров. Их достоинства и недостатки.

---

---

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

---

---

### 13.1. Общие положения

Вторичное оборудование, системы связи, кабели вторичной коммутации на протяжении всего срока службы подвергаются электромагнитным воздействиям разного вида. Невыполнение условий ЭМС приводит к повреждению вторичного оборудования, неправильным действиям (отказам, излишним или ложным срабатываниям) устройств РЗА, перекрытию изоляции кабелей вторичной коммутации и клемм шкафов вторичной коммутации, сбою в работе автоматизированных рабочих мест персонала и т.д., существенно снижает надежность работы энергообъекта.

Критерием выполнения условий ЭМС является обеспечение электромагнитной обстановки, при которой наибольшие возможные уровни электромагнитных воздействий всех видов на объекте электросетевого хозяйства не превышают допустимых значений для каждого конкретного вторичного оборудования.

ЭМС вторичного оборудования и систем связи достигается при выполнении основных требований [37, 38]:

- применение вторичного оборудования с высоким уровнем помехозащищенности;
- применение первичного и вторичного оборудования с ограниченным уровнем эмиссии электромагнитных воздействий;
- выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, обеспечивающих ограничение электромагнитных воздействий.

#### 13.1.1. Требования к вторичному оборудованию по помехоустойчивости и помехоэмиссии

Каждое устройство испытывают на устойчивость к электромагнитным воздействиям. В технической документации на устройство производитель должен указывать уровень помехоустойчивости устройства, степень жесткости испытаний, а также уровень эмиссии электромагнитных воздействий. Рекомендуемые степени жесткости испытаний и параметры испытательных воздействий для устройств вторичного оборудования и систем связи приведены в [39].

Дополнительно установлены требования испытаний по помехоустойчивости в соответствии:

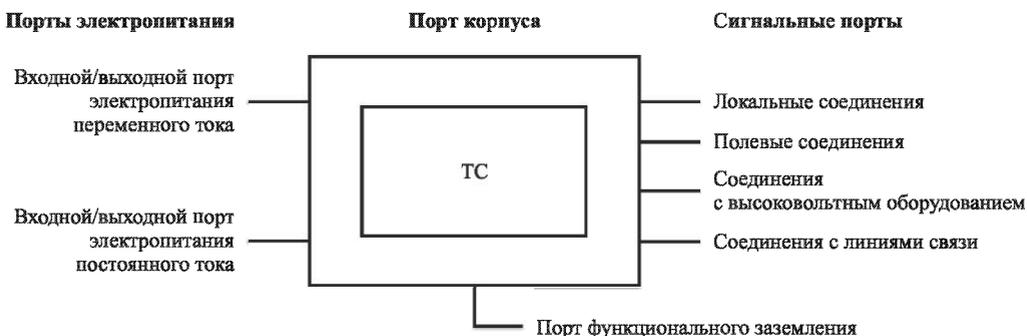
- с ГОСТ 30328–95 (МЭК 60255-5). Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме) и импульсным напряжением;
- ГОСТ Р 50649–94 (МЭК 61000-4-10–93). На устойчивость к импульсному магнитному полю;
- ГОСТ Р 51317.4.14–2000 (МЭК 61000-4-14–2000);
- ГОСТ Р 51317.4.11–99 (МЭК 61000-4-11–94), ГОСТ Р 51317.4.28–2000 (МЭК 61000-4-28–2000) для электропитания переменным током.

Требования к помехоэмиссии ТС приведены в ГОСТ Р 51317.6.2 (МЭК 61000-6-2–97).

Для ТС, размещаемых на энергообъектах в зданиях и сооружениях вдали от РУ высокого и среднего напряжения, должен быть применен ГОСТ Р 51317.6.2, который устанавливает требования по обеспечению электромагнитной совместимости в части устойчивости к электромагнитным помехам ТС, предназначенным для применения в промышленных зонах.

Уровни устойчивости к электромагнитным воздействиям являются основными нормативными параметрами при выполнении проекта.

Испытания на помехоустойчивость должны проводиться для всех портов ТС (рис. 13.1).



**Рис. 13.1. Порты ТС**

Порт – граница между ТС и внешней электромагнитной средой (зажим, разъем, клемма, стык связи и т.п.).

Порт корпуса – это физическая граница ТС, через которую могут излучаться ЭМП, создаваемые ТС, или проникать внутрь, внешние ЭМП.

К портам подключения кабелей относят порты электропитания, сигнальные порты и порты функционального заземления.

К сигнальным портам ТС подключаются проводники или кабели, выполняющие следующие соединения: локальные, полевые, с высоковольтным оборудованием и с линиями связи (рис. 13.2, 13.3).

Локальные соединения: проводники или кабели, подключенные к ТС, функционирующие в условиях легкой электромагнитной обстановки или электромагнитной обстановки средней жесткости:

- они не подключены непосредственно к силовому оборудованию;
- их длины не превышают нескольких десятков метров;
- они используются для целей связи в пределах одного здания.

Полевые соединения: проводники или кабели, подключенные к оборудованию, размещенному на территории подстанции или электростанции при наличии общей системы заземления.

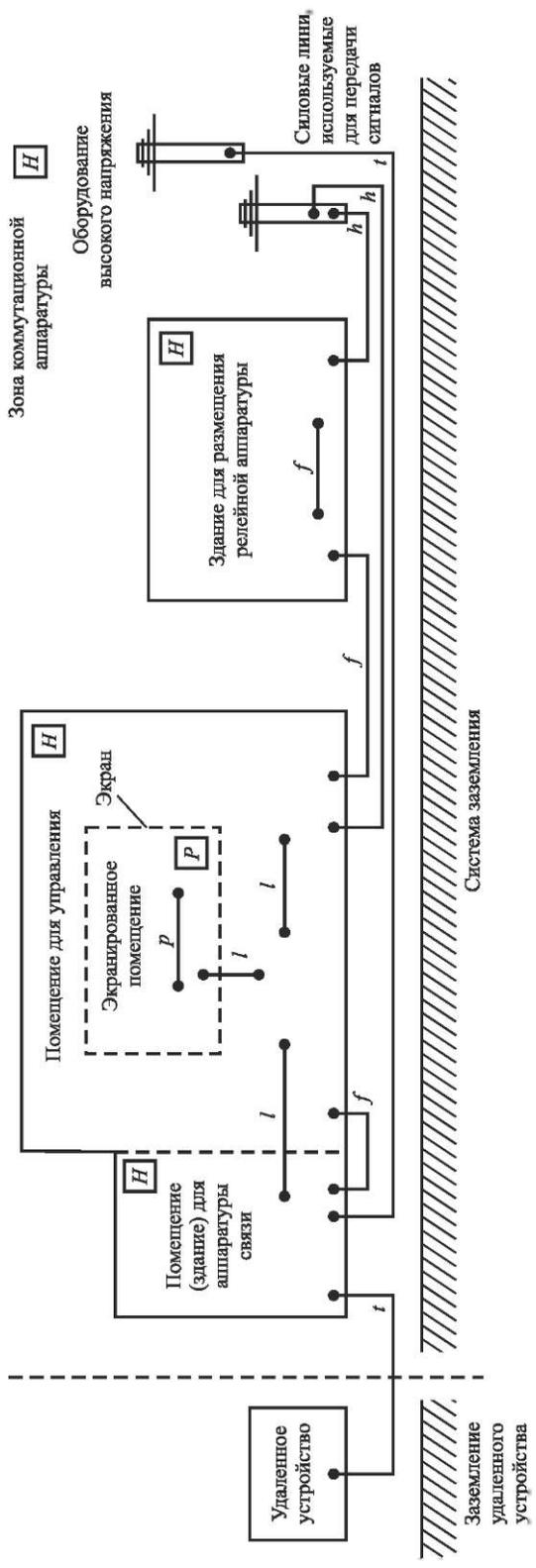


Рис. 13.2. Вилы соседний на подстанции ВН

Соединения с линиями связи: кабели связи, выходящие за пределы распределенной системы заземления электростанции или подстанции для непосредственного соединения (без применения средств защиты от помех) с системой проводной связи или с удаленными объектами.

Порт функционального заземления предназначен для обеспечения единой точки отсчета для сигнальных напряжений.

Виды соединений на подстанции приведены на рис. 13.2.

Классификация мест размещения ТС подстанциях ВН при определении требований для порта корпуса, электропитания и функционального заземления:

- *H* – при отсутствии защиты от помех (например, здания для управления, релейной аппаратуры, места размещения коммутационной аппаратуры);
- *P* – при наличии защиты от помех (например, экранированная зона в здании для управления).
- Виды соединений, характерных для сигнальных портов:
- *l* – локальные (например, соединения внутри помещения для управления);
- *f* – полевые (например, соединения в зоне коммутационной аппаратуры и в здании с релейной аппаратурой);
- *h* – с высоковольтным оборудованием (например, соединения с автоматическими выключателями, трансформаторами тока и напряжения и т.д.);
- *t* – с линиями связи (например, соединения, применяемые при передаче сигналов по высоковольтным линиям и для связи с отдаленными устройствами);
- *p* – «защищенные» соединения, например, соединения внутри экранированного помещения.

Виды соединений на электростанции приведены на рис. 13.3.

Места размещения ТС при определении требований для порта корпуса, электропитания и функционального заземления:

- *G* – размещение на электростанциях при отсутствии защиты от помех (например помещения для управления, размещения аппаратуры контроля, места размещения производственного оборудования);
- *H* – размещение на распределительных устройствах высокого напряжения при отсутствии защиты от помех (например, здания для управления, размещения релейной аппаратуры);
- *P* – «защищенное» размещение (при наличии), например экранированная зона в помещении для управления.
- Виды соединений, подключаемых к сигнальным портам:
- *l* – локальные (например, соединения внутри помещения для управления или помещения для размещения аппаратуры контроля);
- *f* – полевые (например, соединения между местами размещения производственного оборудования и ТС, размещенными в зданиях для управления);
- *h* – с высоковольтным оборудованием (например, соединения в автоматических выключателях, трансформаторами тока и напряжения и т.д.);
- *f* – с линиями связи (например, соединения, применяемые при передаче сигналов по высоковольтным линиям и для связи с отдаленными устройствами);
- *p* – «защищенные» соединения (при наличии), например соединения внутри экранированного помещения.

Виды и уровни испытательных воздействий, рекомендуемых для устройств, устанавливаемых на электросетевых объектах, приведены в табл. 13.1.

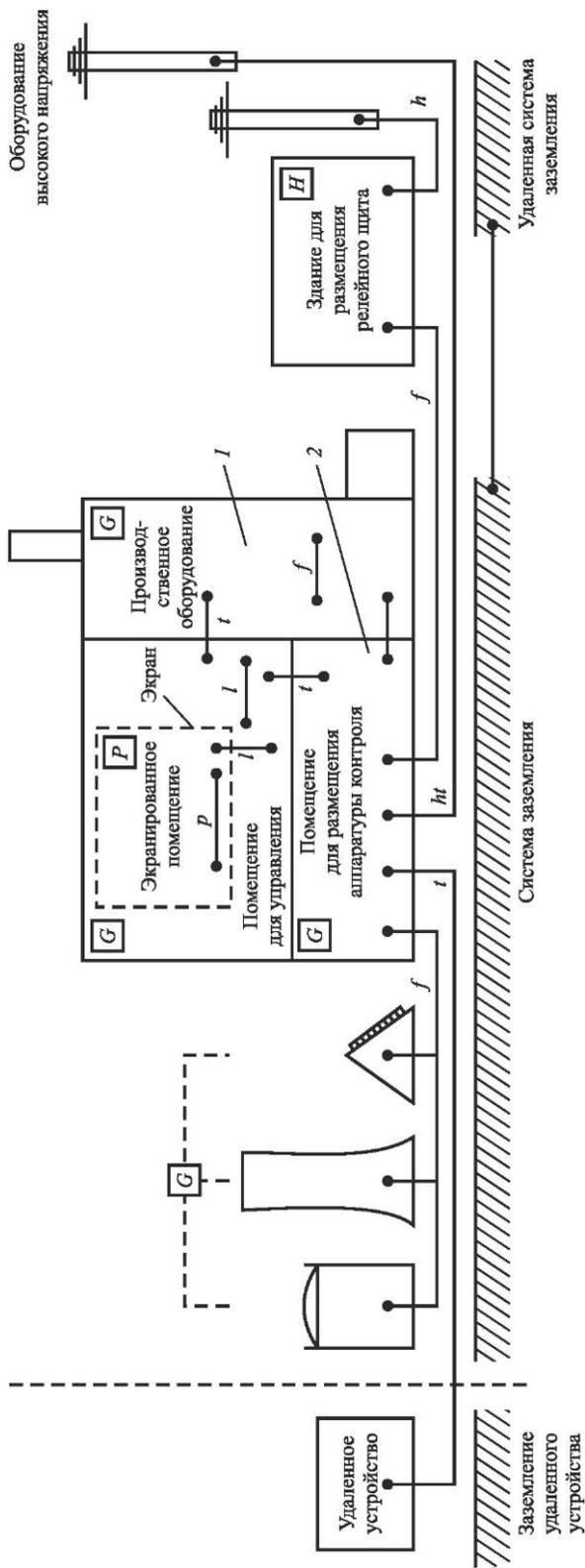


Рис. 13.3. Виды соединений на электростанции:  
 1 – паровой котел, генератор, коммутационная аппаратура, оборудование РУ среднего напряжения и т.д.;  
 2 – аппаратура контроля и управления, электрические реле, преобразователи и т.д.

**Виды и уровни испытаний на помехоустойчивость и помехозащитно вторичного оборудования  
и рекомендуемые степени жесткости испытаний**

Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
Напряжения и токи промышленной частоты при КЗ на землю. Испытания электрической прочности изоляции напряжением в установившемся режиме и импульсным напряжением	ГОСТ ИЕС 60255-5-2014	-	2000 В переменного тока	Для всех портов питания и для портов проводных цепей, выходящих на РУ
<b>Порт корпуса</b>				
Магнитные поля промышленной частоты от силового оборудования в нормальных и аварийных режимах. На устойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93)	5 степень жесткости	100 А/м (длительно), 1000 А/м (кратковременно)	Для устройств чувствительных к магнитным полям
		2 степень жесткости	3 А/м (длительно)	Для мониторов с электронно-лучевой трубкой
Электромагнитные поля радиочастотного диапазона от внешних и внутренних устройств связи. Испытания на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю	ГОСТ 30804.4.3-2013 (ИЕС 61000-4-3:2006)	Не ниже 3 степени жесткости	10 В/м	Для всех устройств
Импульсные магнитные поля от молнии и первичных цепей. Испытания на устойчивость к импульсному магнитному полю	ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 1000-4-10-93)	Не ниже 3 степени жесткости	300 А/м	Для устройств чувствительных к магнитным полям
Разряды статического электричества с персонала. На устойчивость к разрядам статического электричества	ГОСТ 30804.4.2-2013 (ИЕС 61000-4-2-2008)	Не ниже 3 степени жесткости	6 кВ контактный, 8 кВ воздушный	Для всех устройств

Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
<b>Синхронные порты</b>				
Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на исправной стороне. Испытания на устойчивость к коллекторным гашающим помехам	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-97)	<i>Локальное</i> <i>Пазовое</i> 3 степень жесткости (для однократных импульсов) 2 степень жесткости (для повторяющихся импульсов) <i>С оборудованием</i> 4 степень жесткости (для однократных импульсов) 3 степень жесткости (для повторяющихся импульсов)	– 2 кВ (провод-земля), 1 кВ (провод-провод) 1 кВ (провод-земля), 0,5 кВ (провод-провод) 4 кВ (провод-земля), 2 кВ противифазное 2,5 кВ (провод-земля), 1 кВ (провод-провод)	Для всех устройств
Импульсные помехи от токов молнии. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95)	<i>Локальное</i> Провод-земля 2 степень жесткости Провод-провод 1 степень жесткости <i>Пазовое</i> Провод-земля 3 степень жесткости Провод-провод 2 степень жесткости	1 кВ 0,5 кВ 2 кВ 1 кВ	Для всех устройств



Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Напряжение	Примечание
Импульсные помехи от токов молнии. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95)	Провод-земля 3 степень жесткости Провод-провод 2 степень жесткости	2кВ  1 кВ	Для всех портов питания постоянного тока
Наносекундные импульсные помехи от электромеханических устройств в системах электропитания постоянного и переменного тока. Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ 30804.4.4-2013 (IEC 61000-4-4-2004)	4 степень жесткости	4кВ	Для всех портов питания постоянного тока
Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. Испытания на устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)	3 степень жесткости	10 В	Для всех портов питания постоянного тока
Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. Испытания на устойчивость к колебательным затухающим помехам	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-97)	4 степень жесткости (для однократных) 3 степень жесткости (для повторяющихся)	4 кВ (провод-земля), 2 кВ (провод-провод) 2,5 кВ (провод-земля), 1 кВ (провод-провод)	Для всех портов питания постоянного тока
<b>Питание переменным током</b>				
Проводы питания	ГОСТ 30804.4.11-2013 (IEC 61000-4-11-2004)	30% (5 периодов) 60% (1 период)		Только для входных портов
Предустановка питания		100% (5 периодов)		

Испытания на устойчивость к искажениям синусоидальности напряжения электропитания, включая передачу сигналов по электрическим сетям	ГОСТ 30804.4.13-2013 (ПЕС 61000-4-13-2002)	В соответствии с рекомендациями [38]	Для всех портов питания переменного тока
	ГОСТ Р 51317.4.14-2000 (МЭК 61000-4-14-2000)		
Испытания на устойчивость к колебаниям напряжения	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94)		
	ГОСТ Р 51317.4.28-2000 (МЭК 61000-4-28-2000)		
Испытания на устойчивость к изменениям частоты питания в сети переменного тока	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)	Не ниже 3 степени жесткости	Для всех портов питания переменного тока
	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12)		
Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. Испытания на устойчивость к колебательным затухающим помехам	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-96)	Провод-земля 4 степень жесткости Провод-провод 3 степень жесткости	Для всех портов питания переменного тока
	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94)		
Испытания на устойчивость к импульсным помехам от токов молнии. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94)	4 кВ (провод-земля), 2 кВ (провод-провод) 2,5 кВ (провод-земля), 1 кВ (провод-провод)	Для всех портов питания переменного тока
	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94)		

Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
<b>Порт функционального заземления</b>				
Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам (ввод помехи применением емкостных клеммной связи)	ГОСТ 30804.4.4-2013 (IEC 61000-4-4-2004)	4 степень жесткости	4 кВ	Требования применяются к соединением с функциональным заземлением, отделенным от защитного заземления.
Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. Испытания на устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)	Не ниже 3 степени жесткости	(10 В)	10 В = 140 дБ (мкВ)
<b>Помехозащита</b>				
Радиопомехи от оборудования Помехозащита	ГОСТ Р 51318.22-99 (СИСПР 22-97) ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПР 11-97)	В соответствии с ГОСТ		-

Испытания ТС или систем должны проводиться в специальных лабораториях, аккредитованных в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии – Росстандарте (или в аналогичных зарубежных организациях) на все виды испытаний. Испытания на помехоустойчивость и помехоэмиссию должны проводиться по «Методике проведения испытаний», разработанной производителем ТС и соответствовать требованиям ГОСТ на каждый вид испытаний.

Режим функционирования испытуемого ТС должен быть выбран из предусмотренных в технических документах на ТС конкретного вида режимов, и обеспечивать наименьшую устойчивость к помехе конкретного вида. Выбирают конфигурацию, при которой испытуемое ТС обладает наименьшей помехоустойчивостью при соответствии условиям установки и применения ТС.

Для ТС, являющегося частью системы или подключаемого к вспомогательному оборудованию, испытания проводят при минимальной конфигурации подключенного вспомогательного оборудования, необходимой для проведения испытаний и проверки портов ТС.

Испытания следует проводить при климатических условиях, установленных в технических документах на ТС конкретного вида и при номинальном напряжении электропитания ТС, если иное не установлено в стандартах на методы испытаний на помехоустойчивость.

В отдельных и обоснованных случаях допускается проведение испытаний на помехоустойчивость на месте установки ТС. При этом должны быть приняты меры к тому, чтобы не нарушить работоспособность ТС.

### **13.1.2. Требования по обеспечению заданной электромагнитной обстановки на энергообъекте**

Устойчивая и надежная работа вторичного оборудования и систем связи возможна только при условии создания на объекте ЭМО, при которой уровни электромагнитных воздействий всех видов не превышают допустимые для каждого конкретного устройства значения.

Создание требуемой ЭМО для объектов нового строительства, комплексного технического перевооружения и реконструкции, расширения действующих объектов, при модернизации, замене отдельных устройств обеспечивается выполнением комплекса мероприятий, в которые входят:

- разработка технических решений по обеспечению ЭМС на стадии проекта;
- реализация принятых проектных решений в конструкторской, строительной, монтажной и другой документации на стадии разработки рабочей документации;
- авторский надзор за выполнением проектных решений при производстве строительно-монтажных работ;
- проведение приемо-сдаточных испытаний с целью подтверждения достаточности выполненных мероприятий.

Условия обеспечения ЭМС должны быть выполнены для следующих систем:

- релейной защиты;
- электроавтоматики: противоаварийной и автоматического регулирования;
- автоматизированной системы управления технологическим процессом;
- автоматизированной системы диспетчерского управления;

- системы сбора и передачи информации;
- автоматизированной системы контроля, учета и управления электропотреблением;
- противопожарной системы;
- охранной сигнализации;
- видеонаблюдения;
- оперативного постоянного тока;
- электроснабжения переменным током на напряжении 0,4кВ;
- системы управления и сигнализации вспомогательного оборудования;
- диагностики силового оборудования;
- связи.

На электростанциях условия обеспечения ЭМС должны быть выполнены также для системы автоматизированного управления тепломеханического оборудования.

АСУ ТП ТМО состоит из подсистем:

- высокого уровня, включающих в себя рабочие станции, сетевое оборудование, АРМ;
- низкого уровня, включающих в себя локальные САУ.

На электростанции могут быть установлены следующие САУ (локальные):

- САУ газотурбинной установки;
- САУ паротурбинной установки;
- САУ пункта подготовки газа с дожимной компрессорной станцией;
- САУ мазутного хозяйства;
- САУ угольного хозяйства;
- САУ вентиляторных градирен;
- САУ водоподготовительной установки;
- САУ водогрейных и парового котлов в пуско-отопительной котельной;
- САУ очистных сооружений дождевых стоков;
- САУ очистных сооружений нефтесодержащих стоков;
- САУ дизель-генераторной;
- САУ водородного хозяйства.

На этапе приемо-сдаточных испытаний должен быть предусмотрен технический контроль электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости в объеме, указанном в [40].

### 13.1.3. Исходные данные для проектирования

Для проведения расчетных оценок электромагнитной обстановки необходимы исходные данные. Объем исходных данных и методика их получения зависит от вида разрабатываемого проекта:

- вновь строящегося энергообъекта;
- полной реконструкции (техпервооружение) энергообъекта с заменой первичного и вторичного оборудования;
- поэтапной реконструкции (техпервооружение) энергообъекта с заменой части первичного и вторичного оборудования;
- частичной реконструкции (техпервооружение) энергообъекта с заменой отдельных систем;
- замены или оборудования новых отдельных систем; замены или установки новых устройств РЗА, связи и других систем.

Общими исходными данными для проведения оценки выполнения условий электромагнитной совместимости на подстанции являются:

- нормируемые параметры;
- электрическая оперативная схема, характеристики силового оборудования;
- результаты предпроектных изысканий;
- схема расположения оборудования с трассами прокладки кабелей цепей вторичной коммутации;
- расчетные значения токов однофазного (двухфазного) короткого замыкания на каждом из РУ 110 кВ и выше и токов двухфазного замыкания на РУ 6-35 кВ;
- характеристики оборудования систем оперативного постоянного тока и переменного тока.

В качестве нормируемых параметров должны быть приняты уровни испытательных электромагнитных воздействий (помехоустойчивость) для вторичного оборудования и устройств связи.

При проектировании заземляющих устройств дополнительно устанавливают допустимые токи в экранах, броне и оболочке кабелей цепей вторичной коммутации по условиям термической стойкости.

При проектировании молниезащиты устанавливают допустимые расстояния от заземляющего устройства молниеотводов до контрольных кабелей, чтобы исключить возможность перекрытия с заземляющего устройства на кабели при ударе молнии в молниеотводы.

Для системы электроснабжения напряжением 0,4 кВ переменного тока применяются нормируемые параметры по ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

### **13.1.4. Порядок разработки проектных решений по обеспечению ЭМС**

Разработку проектных решений по обеспечению ЭМС вторичного оборудования и систем связи выполняют в соответствии с [38].

Для обеспечения ЭМС вторичного оборудования и систем связи при разработке проекта осуществляют:

- предпроектные изыскания и сбор исходных данных;
- расчетную оценку уровней электромагнитных воздействий на вторичное оборудование и системы связи;
- сопоставление рассчитанных уровней электромагнитных воздействий с уровнями помехоустойчивости вторичного оборудования и устройств связи;
- разработку технических решений по снижению уровней электромагнитных воздействий до допустимых значений.

Критерием обеспечения ЭМС являются условия, при которых уровень всех видов электромагнитных воздействий ниже уровня помехоустойчивости вторичного оборудования и систем связи.

Рекомендуется следующий порядок решения вопросов ЭМС при проектировании энергообъектов.

1. Сбор исходных данных, необходимых для расчетов уровней электромагнитных воздействий, а также данных о помехоустойчивости вторичного оборудования и систем связи.

2. Компоновка энергообъекта с учетом требований по ЭМС. После выполнения компоновки подстанции должны быть проведены расчетные оценки напряженности электромагнитных полей. Для приближенных оценок напряженности электромагнитных полей используют справочные данные, а для точных расчетов специальные компьютерные программы. Если уровень напряженности электромагнитных полей превышает допустимые значения по помехоустойчивости вторичного оборудования и систем связи, то должны быть рассмотрены решения по изменению компоновки.
3. Разработка проекта заземляющего устройства энергообъекта в соответствии с требованиями ПУЭ и с учетом требований по ЭМС. Расчеты напряжений и токов, воздействующих на вторичное оборудование и системы связи при КЗ с помощью компьютерной программы. Сравнение полученных результатов расчетов с допустимыми значениями. При превышении допустимых значений разрабатывают мероприятия по усилению заземляющего устройства.
4. Разработка проекта кабельной канализации с учетом требований по ЭМС. Расчет уровней импульсных помех во вторичных цепях при коммутациях силового оборудования и КЗ с помощью компьютерной программы. Сравнение полученных результатов расчетов с допустимыми значениями. При превышении допустимых значений разрабатывают мероприятия по снижению уровней импульсных помех.
5. Разработка проекта молниезащиты с учетом требований по ЭМС. Расчет уровней импульсных помех во вторичных цепях при ударах молнии в молниеотводы с помощью компьютерной программы. Сравнение полученных результатов расчетов с допустимыми значениями. При превышении допустимых значений разрабатывают мероприятия по снижению уровней импульсных помех.
6. Разработка проекта систем электропитания постоянного и переменного тока с учетом требований по ЭМС.
7. Применение мероприятий по защите от электромагнитных полей и разрядов статического электричества в соответствии с требованиями по ЭМС.

Результаты расчетов уровней электромагнитных воздействий и разработанные мероприятия по обеспечению ЭМС вторичного оборудования и систем связи должны быть представлены в специальном разделе проекта по ЭМС. В разделе проекта по ЭМС должны быть приведены сравнительные данные по расчетным уровням электромагнитных воздействий и помехоустойчивости вторичного оборудования и систем связи.

### **13.2. Компоновка оборудования, зданий и сооружений**

Уровень воздействий напряжений и токов промышленной частоты, электромагнитных полей и импульсных помех на вторичное оборудование зависит от решений по компоновке оборудования, зданий и помещений. Обеспечение благоприятной ЭМО при компоновке позволяет снизить затраты на применение дополнительных мероприятий по защите от опасных электромагнитных воздействий.

Уровень напряжений и токов промышленной частоты, воздействующих на вторичное оборудование при коротких замыканиях на землю в первичных цепях, зависит от выбора места расположения здания ОПУ (РЩ, ГЩУ), АТ/Т на территории объекта. Особенно важно это учитывать на энергообъектах с несколькими РУ разного класса напряжения.

Наибольшее значение напряжения, воздействующего на контрольные кабели и оборудование, определяют как разность потенциалов на ЗУ между местом КЗ и РЩ (ОПУ, ГЩУ). С ростом расстояния между РЩ (ОПУ, ГЩУ) и РУ возрастает и разность потенциалов. При ближнем внешнем КЗ на землю наибольший потенциал на ЗУ будет в месте заземления нейтрали АТ/Т. В этом случае наибольшее значение напряжения, воздействующего на вторичные кабели и оборудование, определяют как разность потенциалов на ЗУ между АТ/Т и РЩ. При КЗ на землю на шинах, расположенных между АТ/Т и РЩ (в точках, наиболее приближенных к РЩ) разность потенциалов на ЗУ между АТ/Т и РЩ имеет наибольшее значение, например, при КЗ на ОРУ 110кВ для компоновки, приведенной на рис. 13.4.

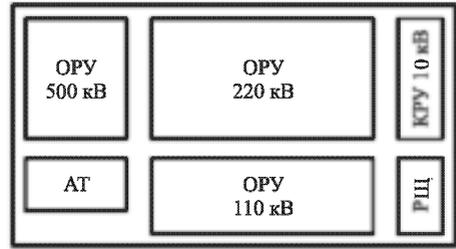


Рис. 13.4. Пример неудачной компоновки ПС ВН

Для снижения напряжений и токов промышленной частоты, воздействующих на вторичное оборудование при КЗ на землю, при такой компоновке необходимо существенно увеличивать затраты на выравнивание потенциалов на ЗУ на всей территории подстанции по сравнению с компоновкой на рис. 13.5.

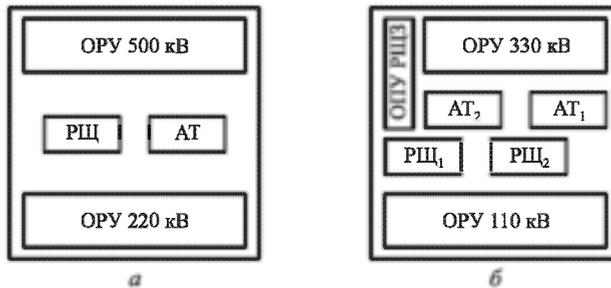


Рис. 13.5. Примеры рекомендуемой компоновки ПС ВЛ

Снижение уровней воздействия напряжений промышленной частоты на вторичное оборудование при КЗ на землю достигается (см. рис. 13.4) размещением РЩ между РУ различного напряжения, применением для каждого РУ отдельного РЩ, расположенного вблизи РУ, или применением распределенных РЩ на несколько присоединений одного напряжения.

При выборе указанных мероприятий по компоновке необходимо также обеспечить допустимые уровни напряженности магнитных полей в местах размещения вторичного оборудования и допустимые значения токов в экранах контрольных кабелей.

На энергообъектах с ОПУ шины первичных цепей не должны размещаться над зданием РЩ или ОПУ. При такой компоновке возможно КЗ на здание РЩ (ОПУ, ГЩУ). При этом на ЗУ здания будет наибольший потенциал, ток КЗ будет растекаться по экранам и броне вторичных кабелей и может превысить допустимое по термической стойкости значение.

Наиболее эффективными мероприятиями по снижению уровней электромагнитных полей является удаление силового оборудования от вторичного оборудования.

Реализовать эти мероприятия проще всего на этапе компоновки объекта. Если при компоновке объекта не приняты меры по разнесению источников электромагнитных полей и вторичного оборудования на безопасное расстояние, то необходимо применять дополнительные мероприятия по экранированию вторичного оборудования.

Источниками сильных магнитных полей промышленной частоты являются токоограничивающие реакторы и шины первичного оборудования.

В зависимости от типа реакторов, их расположения и номинального тока (1-5 кА) допустимое расстояние до помещений, в которых расположено вторичное оборудование и устройства связи, составляет:

- от 5 м до 11 м (для 4-й степени жесткости испытаний на помехоустойчивость);
- от 3 м до 9 м (для 5-й степени жесткости испытаний на помехоустойчивость).

Для диспетчерских помещений, где персонал может находиться более 8 часов, допустимое расстояние составляет от 10 до 15 м и более.

Точные расчеты напряженности магнитного поля проводят с помощью компьютерной программы.

Напряженность магнитного поля в местах расположения устройств РЗА, счетчиков электроэнергии и другого оборудования в КРУ 6–20 кВ зависит от номинального тока (тока КЗ) и расположения шин РУ. При проектировании необходимо выбирать ячейки КРУ, в которых принятое заводом изготовителем расположение шин обеспечивает допустимые значения напряженности магнитного поля, или дать заказ заводу-изготовителю на изменение расположения шин.

Расположение шин высокого напряжения вблизи зданий ОПУ создает неблагоприятные условия для персонала из-за превышения санитарных норм по напряженности магнитного поля, а также для работы видеодисплейных терминалов. Допустимое расстояние определяется расчетом с помощью компьютерной программы.

Уровень импульсных и периодических помех, возникающих при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне, зависит от расположения трасс прокладки вторичных кабелей (табл. 13.2).

При компоновке оборудования и выборе трасс прокладки вторичных кабелей следует располагать кабельные трассы так, чтобы участки, параллельные системам шин или протяженным участкам ошиновки ячеек, располагались как можно дальше от первичных цепей. Снижение уровней импульсных помех достигается при расположении кабельной трассы перпендикулярно наиболее протяженным участкам ошиновки. В первую очередь кабельные трассы следует удалять от участков ошиновки, подвешенных наиболее низко.

При компоновке энергообъекта для защиты от прямого удара молнии на подстанциях применяют стержневые (отдельно стоящие или порталные) и тросовые молниеприемники. Правильное расположение молниесводов по отношению к кабельным трассам, зданиям и сооружениям, в которых установлено вторичное оборудование, позволяет удалить источник электромагнитного возмущения от вторичных цепей и оборудования. Допустимое расстояние от молниесводов до кабельных трасс, зданий и сооружений должно определяться расчетом.

Вынос стержневых и тросовых опор за внешний периметр объекта (в соответствии с указаниями [42]) снижает вероятность искровых перекрытий между заземлителями молниесводов и кабельными коммуникациями, нарушающих работу вторичного оборудования.

Наибольшие уровни импульсных помех (степень жесткости испытаний) во вторичных кабелях при коротких замыканиях в первичных цепях

Тип кабельной кабелизации	Тип кабелей	Трасса прокладки кабелей	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Степень жесткости испытаний				
				Класс напряжения ОРУ, кВ				
				110	220	330	500	750
Открыто или в ж/б кабельных лотках (дополнительное экранирование не обеспечивается)	Без экрана и брони	Параллельно опинковке на расстоянии менее 3 м (длина параллельной трассы более 10 м)	–	Выше 4 не рекомендуется				
			100	4	Выше 4 не рекомендуется			
		Параллельно опинковке на расстоянии менее 5 м (длина параллельной трассы более 10 м)	Выше 4	Выше 4 не рекомендуется				
			1000	Выше 4				
		Параллельно опинковке на расстоянии менее 7 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
			400	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
	1000	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		–	2					
	С экраном или броней	Параллельно опинковке на расстоянии 1 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
			400	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
			1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
			100	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4
400			4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
1000			4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
Параллельно опинковке на расстоянии 3 м (длина параллельной трассы более 10 м)		100	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		400	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		100	3	3	4	Выше 4	Выше 4	
		400	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
Параллельно опинковке на расстоянии 5 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	2	3	4	Выше 4	Выше 4		
	400	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4		
	1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4		
	100	2	3	4	Выше 4	Выше 4		
	400	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4		
	1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4		
Перпендикулярно опинковке	–	–	1					
		–	1					
		–	1					

Тип кабельной канализации	Тип кабелей	Трасса прокладки кабелей	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Стенная жесткость испытаний					
				Класс напряжения ОРУ, кВ					
				110	220	330	500	750	
В магистральном кабельном лотке ( $K_{\text{зщ}} = 4$ )	Без экрана и брони	Параллельно ошиновке на расстоянии 1 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
			400	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 3 м	1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
			100	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 5 м (длина параллельной трассы более 10 м)	400	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
			1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 7 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	2	3	4	4	Выше 4	
			400	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 10 м	1000	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
			100	2	3	4	4	4	
		Перпендикулярно ошиновке	400	3	4	4	Выше 4	Выше 4	
			1000	3	4	Выше 4	Выше 4	Выше 4	
	С экраном или броней		Параллельно ошиновке на расстоянии 1 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	2	3	4	4	Выше 4
				400	3	3	4	4	Выше 4
		Параллельно ошиновке на расстоянии 3 м (длина параллельной трассы более 10 м)	1000	3	3	4	4	Выше 4	
			100	1	2	3	3	4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 5 м (длина параллельной трассы более 10 м)	400	2	3	4	4	Выше 4	
			1000	3	3	4	4	Выше 4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 7 м (длина параллельной трассы более 10 м)	100	1	2	2	3	3	
			400	2	3	3	4	4	
		Параллельно ошиновке на расстоянии 10 м	1000	2	3	4	4	Выше 4	
			100	1	1	2	2	3	
		Перпендикулярно ошиновке	400	1	1	2	2	3	
			1000	1	2	3	3	4	

В электрически непрерывной металлической трубе ( $K_{ср} = 10$ )	Без экрана и брони	Параллельно оплывке на расстоянии 1 м	100	3	3	4	Выше 4	Выше 4	
			400	3	4	4	Выше 4	Выше 4	
			1000	3	4	4	Выше 4	Выше 4	
	Параллельно оплывке на расстоянии 3 м	100	2	3	3	4	4		
		400	3	3	4	Выше 4	Выше 4		
		1000	3	4	4	Выше 4	Выше 4		
	Параллельно оплывке на расстоянии 5 м	100	1	2	3	3	4		
		400	2	3	3	4	Выше 4		
		1000	3	3	4	Выше 4	Выше 4		
	Параллельно оплывке на расстоянии 7 м	100	1	1	2	3	3		
		400	2	3	3	3	4		
		1000	2	3	4	4	Выше 4		
	В подземном кабельном канале или тоннеле ( $K_{ср} = 100$ )	С экраном или броней	Перпендикулярно оплывке	-	1			1	
				-	1	2	3	3	4
				100	1	1	2	2	3
Параллельно оплывке на расстоянии 1 м		400	1	2	3	3	3		
		1000	1	2	3	3	3		
		100	1	1	1	2	2		
Параллельно оплывке на расстоянии 3 м		400	1	1	2	3	3		
		1000	1	2	3	3	3		
		100	1	1	1	1	1		
Параллельно оплывке на расстоянии 5 м		400	1	1	2	3	3		
		1000	1	2	3	3	3		
		100	1	1	1	1	1		
Параллельно оплывке на расстоянии 7 м		400	1	1	1	2	3		
		1000	1	2	2	2	3		
		-	1			1			
Без экрана и брони	Перпендикулярно оплывке	-	1			1			
		-	Не более 2			1			
		-	1			1			

При монтаже. Степень жесткости испытывающей дуги с учетом погрешности расчетов (не более 20%).

Расположение антенных мачт и стержневых молниеотводов вблизи РЩ (ОПУ, ГЩУ) не рекомендуется, так как при ударе молнии возможен занос высоких потенциалов и токов, а также высокий уровень импульсных магнитных полей. В случае размещения вблизи РЩ (ОПУ/ГЩУ) антенных мачт должны быть выполнены дополнительные мероприятия по защите вторичных цепей и аппаратуры от импульсных перенапряжений и магнитных полей. Молниезащиту зданий выполняют в соответствии с [43].

Для снижения уровней электромагнитных полей радиочастотного диапазона от внутренних радиопередающих устройств связи, необходимо размещать их на безопасном расстоянии от вторичного оборудования. Допустимое расстояние определяется в зависимости от мощности радиопередающего устройства (табл. 13.3, 13.4).

Таблица 13.3

**Напряженности электрического поля,  
создаваемого некоторыми радиопередатчиками**

Источник	Частотный диапазон, МГц	Типичное максимальное эффективное значение излучаемой мощности, Вт	Типичное минимальное расстояние, м	Электрическое поле в соответствующей точке, В/м
Радиотрансляция в диапазоне ДВ и в приморской зоне	0,014–0,5	$2,5 \times 10^6$	$2 \times 10^3$	5,5
Радиотрансляция в диапазоне СВ	0,2–1,6	$800 \times 10^3$	500	12,5
Любительские КВ-радиостанции	1,8–30	$1 \times 10^3$	10	22
КВ связь, включая радиотрансляцию	1,6–30	$10 \times 10^3$	$1 \times 10^3$	0,1
«Гражданский» диапазон	27–28	12	10	2,5
Любительские радиостанции диапазона ОВЧ и УВЧ	50–52 144–146 432–438 1290–1300	$8 \times 10^3$ $8 \times 10^3$ $8 \times 10^3$ $8 \times 10^3$	10	65
Стационарные и мобильные средства связи	29–40 68–87 146–174 422–432 438–470 860–990	130 130 130 130 130 130	2	40
Портативные телефоны, включая сотовые и радиотелефоны	900–1900	5	0,5	30

Источник	Частотный диапазон, МГц	Типичное максимальное эффективное значение излучаемой мощности, Вт	Типичное минимальное расстояние, м	Электрическое поле в соответствующей точке, В/м
Телевидение диапазона МВ (ОВЧ)	48–68 174–230	$320 \times 10^3$ $320 \times 10^3$	500	8
Радиотрансляция в диапазоне FM	88–108	$100 \times 10^3$	250	9
Телевидение диапазона ДМВ (УВЧ)	470–853	$500 \times 10^3$	500	10
Радарные установки	1000–30 000	$10 \times 10^6$	200	110
Приемопередатчики уоки-токи (walky-talky)	27–1000	5	0,5	30

Таблица 13.4

### Ослабление поля от переносной радиостанции с расстоянием и наличием искусственных преград

Условия измерения	Расстояние до передатчика, м	$E$ , В/м
Без преград	1	25
Без преград	10	0,52
Перекрытие и стена	10	0,005
Стена между РЦ и УВК	5	0,05

Наибольшие значения напряженности электрического поля  $E$ , В/м, приведенные в табл. 13.3 (согласно МЭК 61000-2-3, 1992 г.), получены по выражению (бралось максимальное значение):

$$E = k(\text{ЭИМ})^{0,5} r^{-1},$$

где  $k$  – постоянная величина ( $k = 7$  для всех источников в таблице, кроме устройств уоки-токи, для которых  $k = 3$  см. МЭК 61000-4-3); ЭИМ – эффективная излучаемая мощность [Вт];  $r$  – минимальное расстояние [м] от источника излучения.

## 13.3. Заземляющие устройства

### 13.3.1. Общие требования к заземляющим устройствам

Заземляющие устройства выполняют по условиям электробезопасности и ЭМС. Электробезопасность, характеризуемую предельно допустимыми значениями напряжения прикосновения, обеспечивают в первую очередь при любых условиях эксплуатации энергообъекта. Для обеспечения электробезопасности применяют систему выравнивания и уравнивания потенциалов с помощью заземлителей, заземляющих проводников и проводников уравнивания потенциалов.

Мероприятия по обеспечению ЭМС при проектировании ЗУ различаются для энергообъектов:

- вновь строящихся;
- при полной реконструкции (техпереворужение) с заменой первичного и вторичного оборудования;
- при поэтапной реконструкции (техпереворужение) с заменой части первичного и вторичного оборудования;
- при частичной реконструкции (техпереворужение) с заменой отдельных систем;
- при замене или оборудовании новых отдельных систем; замены или установки новых устройств АСТУ, связи и других систем.

Особые требования предъявляют к ЗУ энергообъектов с КРУЭ.

Во всех случаях при проектировании ЗУ должны проводиться предпроектные изыскания.

Для вновь строящихся объектов при полной реконструкции в объем предпроектных изысканий входит измерение удельного сопротивления грунта методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Эквивалентное удельное сопротивление грунта принимают для наиболее неблагоприятных климатических условий.

При поэтапной реконструкции и при частичной реконструкции проводят обследование ЗУ в соответствии с требованиями [44]. При замене или оборудовании новых отдельных систем, замены или установки новых устройств проводят предпроектное обследование ЗУ только в части, относящейся к этим устройствам (включая места прокладки вторичных цепей этих устройств) или системам.

При проектировании ЗУ токи КЗ и их составляющие (токи нейтралей, потенциалоповышающие токи и т.д.) рассчитывают с учетом развития энергосистемы. Выбор токов КЗ меньших по значению должен быть обоснован. Время отключения КЗ на землю принимается с учетом работы УРОВ и времени работы выключателя.

### **13.3.2. Заземляющее устройство энергообъектов с открытыми распределительными устройствами**

В сетях с эффективно заземленной нейтралью ток КЗ на землю на шинах РУ, в общем случае, складывается из тока КЗ от трансформаторов/автотрансформаторов (Т/АТ) и тока КЗ от энергосистемы (ЭС) (рис. 13.6). От места КЗ ток возвращается в нейтраль Т/АТ и ЭС через заземляющее устройство и непосредственно через землю.

Суммарное распределение потенциалов (рис. 13.7) по ЗУ получают по принципу наложения как сумму распределения от токов КЗ от Т/АТ и от ЭС.

В сетях с изолированной нейтралью протекание наибольшего тока по ЗУ возможно при замыкании на землю двух фаз. В этом случае ток протекает от точки замыкания на землю одной фазы до точки замыкания на землю другой фазы. Распределение потенциалов на ЗУ будет аналогично тому, как при протекании тока от Т/АТ (см. рис. 13.7).

Нормируемыми параметрами по условиям обеспечения ЭМС для токов и напряжений промышленной частоты являются:

- напряжение на ЗУ (относительно зоны нулевого потенциала);
- напряжение между ЗУ силового оборудования (при КЗ на землю) и ЗУ в месте расположения вторичного оборудования, к которому приходят кабели от силового оборудования;
- токи по экранам, броне, оболочкам и проводникам.

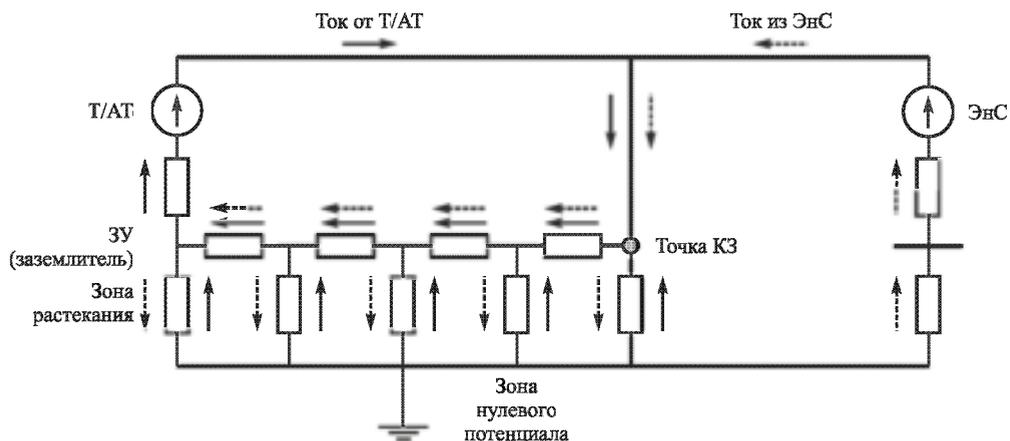


Рис. 13.6. Схема растекания тока при коротком замыкании на землю

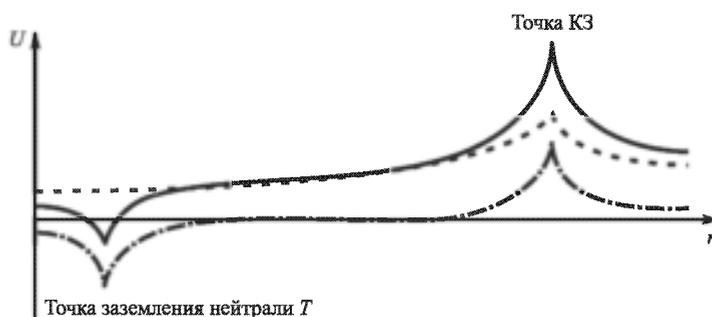


Рис. 13.7. Распределение потенциалов на заземляющем устройстве: сплошная кривая – суммарное; штрих-пунктирная – от тока Т/АТ; пунктирная – от тока ЭС

Напряжение на ЗУ воздействует на изоляцию кабелей (связи, телемеханики и др.), отходящих от электросетевого объекта. Значение напряжения на ЗУ не должно превышать 5 кВ (гл. 1.7 ПУЭ). Если напряжение на ЗУ выше 5 кВ, то необходимо принимать меры по защите отходящих кабелей.

Разность потенциалов на ЗУ между точкой КЗ (или местом заземления нейтрали АТ/Т) и местом расположения вторичного оборудования, к которому приходят кабели с РУ, воздействует на изоляцию кабелей и вторичного оборудования. Наибольшее значение разности потенциалов на ЗУ не должно превышать 2 кВ.

Токи по экранам, броне, оболочкам и проводникам не должны вызывать их термического повреждения. Допустимое значение токов зависит от сечения и материала экрана, брони, оболочки и проводника и определяется расчетом (см. гл. 14).

Для проектирования заземляющего устройства необходимо иметь следующие основные исходные данные:

- характеристики электрической структуры грунта (на глубину не менее 0,5 размеров диагонали ЗУ электросетевого объекта);
- планы расположения зданий, сооружений, заземляемого оборудования;
- схемы трасс кабелей вторичных цепей между зданиями и сооружениями, используемые марки кабелей;

- параметры (материал, геометрические размеры) и расположение естественных заземлителей;
- максимальные значения однофазных (двухфазных) токов коротких замыканий и токов в нейтральных силовых трансформаторов;
- места заземления нейтралей трансформаторов.

При выполнении проекта реконструкции (техпереворужения) энергообъектов на этапе предпроектных изысканий определяют параметры ЗУ в соответствии с требованиями [40].

Для вновь строящегося объекта выполняют ЗУ в соответствии с требованиями гл. 1.7 ПУЭ, руководствуясь методическими указаниями ведущих проектных институтов.

Схему ЗУ по первоначальному проектному решению принимают в качестве исходных данных для проведения расчетов с помощью специальной компьютерной программы.

При выполнении проекта реконструкции (техпереворужения) энергообъекта в качестве исходных данных принимают исполнительную схему ЗУ, составленную при проведении предпроектных изысканий.

При проведении расчетов рассматривают следующие режимы, различающиеся растеканием тока по ЗУ:

- однофазного (двухфазного) короткого замыкания на землю;
- ближнего внешнего короткого замыкания на землю;
- замыкания на землю двух фаз в сети с изолированной нейтралью.

В расчетной схеме учитывают искусственные (заземлители и заземляющие проводники) и естественные (трубопроводы, оболочки, броня и экраны кабелей, металлоконструкции, железобетонные фундаменты, грозотросы) элементы заземляющего устройства.

В результате расчетов определяют наибольшие значения напряжения на ЗУ, напряжения, воздействующего на изоляцию кабелей и вторичного оборудования, и значения токов в экранах, оболочках или броне кабелей.

Для проверки выполнения условий электробезопасности проводят расчет напряжений прикосновения.

При значении напряжения на ЗУ выше 5 кВ применяют технические решения по уменьшению сопротивления ЗУ.

Уменьшение сопротивления ЗУ может быть достигнуто установкой вертикальных заземлителей по периметру ЗУ, глубинных заземлителей или обсадных труб скважин. Применение вертикальных заземлителей дает положительный эффект лишь при достижении слоев грунта с низким удельным сопротивлением.

При наличии вблизи объекта участков грунта с низким удельным сопротивлением можно снизить сопротивление ЗУ, оборудовав выносной заземлитель, обеспечив в месте его расположения условия электробезопасности.

При невозможности (или экономической нецелесообразности) выполнения указанных мероприятий, обеспечивают защиту отходящих проводных коммуникаций или применяют волоконно-оптические линии связи.

Если напряжение на ЗУ между точкой КЗ (или местом заземления нейтрали АТ/Т) и местом расположения вторичного оборудования, к которому приходят кабели с РУ превышает 2 кВ, то применяют технические решения по выравниванию потенциалов на ЗУ.

Для снижения потенциала на ЗУ оборудования (включая место заземления АТ/Т) выполняют соединения с сеткой заземлителей дополнительными параллельными заземляющими проводниками, увеличивают сечение заземляющих проводников, уменьшают шаг сетки заземлителей вблизи оборудования или применяют материал с более высокой проводимостью (например, медь).

Для снижения разности потенциалов на ЗУ уменьшают шаг сетки заземлителей, увеличивают сечение заземлителей или применяют материал с большей проводимостью, прокладывают в кабельных каналах дополнительные параллельные заземляющие проводники. При наличии нескольких ОРУ увеличивают количество связей по заземлителям между ОРУ.

После выполнения указанных мероприятий проводят повторно расчет.

Для устранения опасности термического повреждения кабелей применяют последовательно технические решения:

- увеличение количества связей ЗУ РЩ (ОПУ, ГРЩ) с сеткой заземлителей;
- прокладку в кабельной канализации параллельного проводника;
- используют кабели с увеличенным сечением экрана, брони или оболочки.

Заземление цепей тока, проходящих с РУ от разных ТТ на одно устройство РЗА, рекомендуется выполнять на РЩ.

При коммутациях (через паразитные емкости оборудования на землю) и коротких замыканиях на землю через заземлитель протекает ток высокой частоты (ВЧ составляющая тока КЗ). Ток возникает вследствие переходного процесса в первичных цепях. На ЗУ оборудования возникает скачок потенциала.

Для цепей ВЧ-связи, напряжения и тока, заземленных на РУ импульсный потенциал с определенным коэффициентом ослабления передается на вход вторичного оборудования. Наименьшее значение коэффициента ослабления для экранированных кабелей с заземлением экранов с двух сторон равно 6. При применении неэкранированных кабелей или экранированных кабелей с заземлением экранов с одной стороны коэффициент ослабления принимают равным 1 для всех цепей.

Импульсный потенциал воздействует на изоляцию и клеммные зажимы вторичных кабелей цепей управления и сигнализации (гальванически не связанных с ЗУ), отходящих от оборудования, и может вызвать перекрытие изоляции. Наименьшее значение пробивного импульсного напряжения типовых клеммных зажимов не меньше 10 кВ. После пробоя изоляции импульсный потенциал передается на вход вторичного оборудования с коэффициентом ослабления не менее 6.

Если импульсный потенциал на ЗУ не превышает 10 кВ (пробоя изоляции клеммных зажимов не происходит), то импульсный потенциал передается через паразитные емкости по кабелям на входы вторичного оборудования с коэффициентом ослабления более 10.

Расчет значений импульсных помех, возникающих из-за подъема потенциалов на заземлении оборудования при коммутациях и коротких замыканиях на землю, проводят с помощью специальной компьютерной программы. В программе моделируют схему ЗУ объекта. В точке, где устанавливается оборудование, задают импульсную ВЧ составляющую тока КЗ. Параметры импульсного тока определяют расчетом с помощью компьютерной программы или, для приближенных расчетов, могут быть взяты значения из табл. 13.7 и 13.8.

Таблица 13.7

### Параметры ВЧ составляющей тока КЗ (для ОРУ)

$U_{\text{ном}}$ , кВ	110	220	330	500	750
$I_{\text{ВЧ}}$ , кА	1	2	6	8	12
$f_{\text{осн}}$ , МГц	1	0,8	0,3	0,15	0,1

Таблица 13.8

### Параметры ВЧ составляющей тока КЗ (для КРУЭ)

$U_{\text{ном}}$ , кВ	110	220	330	500
$I_{\text{ВЧ}}$ , кА	6	12	18	25
$f_{\text{осн}}$ , МГц	2	2	2	2

Примечание.  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение первичных цепей;  $I_{\text{ВЧ}}$  – наибольшее значение ВЧ составляющей тока КЗ;  $f_{\text{осн}}$  – основная частота колебаний импульсного тока.

В результате расчета определяют потенциал на оборудовании – потенциал в месте ввода тока. При расчете помехи в измерительных цепях, заземление которых выполнено в клеммном шкафу, установленном отдельно (не на стойках оборудования или порталах) дополнительно определяют потенциал в месте установки такого клеммного шкафа.

Полученный потенциал на ЗУ оборудования сравнивают с допустимым значением для изоляции отходящих от оборудования кабелей или клеммников вторичных цепей.

Определяют значение импульсной помехи, передающейся на входы устройств вторичного оборудования, для чего значение потенциала на ЗУ оборудования (или потенциала на ЗУ клеммного шкафа – для соответствующих цепей) делят на коэффициент ослабления.

Полученные значения помехи во вторичных цепях (с учетом погрешности расчетов) сравнивают с допустимым для оборудования и, тем самым, проверяют выполнение требований ЭМС.

Если потенциал на оборудовании превышает допустимое значение, то принимают последовательно технические решения по уменьшению импульсного сопротивления ЗУ: увеличение числа заземляющих проводников; уменьшение шага сетки заземлителя вблизи оборудования; установка дополнительных вертикальных заземлителей вблизи оборудования.

При срабатывании ОПН от набегающей волны грозового перенапряжения через ЗУ проходит импульсный ток. Импульсный подъем потенциала возникает на ЗУ оборудования, расположенного вблизи ОПН. Расчет значений импульсных потенциалов проводят с помощью специальной компьютерной программы. Параметры импульсного тока при проведении расчетов принимают в соответствии с МЭК 60099-4.

Полученный потенциал на ЗУ оборудования сравнивают с допустимым значением для изоляции отходящих от оборудования кабелей или клеммников вторичных цепей. Определяют значение импульсной помехи, передающейся на входы устройств вторичного оборудования, для чего значение потенциала на ЗУ оборудования (или потенциала

на ЗУ клеммного шкафа – для соответствующих цепей) делят на коэффициент ослабления. Полученные значения помехи во вторичных цепях (с учетом погрешности расчетов) сравнивают с допустимым для оборудования и, тем самым, проверяют выполнение требований ЭМС.

### 13.3.3. Заземление зданий и сооружений

При выполнении устройства заземления внутри зданий ГЩУ, РЩ и ОПУ, а также других зданий и сооружений, содержащих вторичное оборудование и системы связи, используют замкнутую сеть заземления. При этом в качестве элементов ЗУ используют все имеющиеся металлические конструкции, как горизонтальные, так и вертикальные (рамы, рельсы, балки, железобетонная арматура, кабельные лотки и каналы и т.д.).

Для заземления корпусов оборудования, экранов кабелей следует использовать общее внутреннее устройство заземления. К внутреннему устройству заземления относят: эквипотенциальные сетки; магистрали заземления.

К эквипотенциальным сеткам кратчайшим путем должны быть присоединены все следующие элементы:

- металлоконструкции зданий (стальные балки, колонны и т. п.);
- металлические трубопроводы, включая трубы для электропроводки, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов и смесей;
- кабельные лотки, опорные кабельные конструкции и т. п.

Магистрали заземления должны образовывать замкнутые контуры по внутренним периметрам зданий. Магистрали заземления, расположенные на разных отметках зданий должны последовательно соединяться между собой не менее чем в 4-х точках.

К магистралям заземления кратчайшим путем присоединяют: металлические корпуса или рамы электрооборудования; металлические корпуса распределительных устройств и электрощитов; металлические рамы КРОССов; шкафы и установки постоянного тока; пульты управления; панели приборов; ЭВМ; корпуса электродвигателей электрических аппаратов и трансформаторов.

Ряды рамных конструкций оборудования (шкафов) соединяют между собой проводниками с шагом не более чем 2 м. Каждый ряд рамной конструкции присоединяют к магистралям заземления не менее чем в 4-х местах. Экраны кабелей и параллельные заземленные проводники присоединяют к шинам заземления (корпусам) шкафов/панелей. Внутреннее устройство заземления присоединяют к наружному контуру заземления не менее чем в 4-х точках.

В случае если несколько различных корпусов оборудования (шкафов, панелей) установлены в ряд, то от одной стены до другой вдоль оборудования прокладывают металлическую шину, объединяющую все указанное оборудование (шкафы, панели).

Кабельные лотки из проводящих материалов заземляют на обоих концах и в местах пересечения других металлических элементов.

Заземление помещений связи выполняют в соответствии с требованиями стандарта ANSI/TIA/EIA-607-1994.

Аппаратура связи должна быть присоединена к заземляющему устройству здания посредством изолированного заземляющего проводника. Заземляющий проводник должен быть изготовлен из меди, и иметь сечение не менее 60 мм<sup>2</sup>.

Заземляющий проводник присоединяют с одной стороны к главной заземляющей шине вводного распределительного устройства здания (щита собственных нужд),

гальванически связанной с глухозаземленной нейтралью трансформатора собственных нужд и металлоконструкциями здания. С другой стороны заземляющий проводник присоединяют к установленной в аппаратной шине заземления аппаратуры связи.

Блоки аппаратуры связи должны присоединяться к главной заземляющей шине аппаратной посредством заземляющих перемычек. Все металлические лотки телекоммуникационной кабельной системы, расположенные в аппаратной должны быть присоединены шлейфами к шине заземления аппаратной.

Шина заземления распределительного щитка аппаратуры связи, получающей питание от сети переменного тока или ее корпус, должны быть соединены шлейфом с шиной заземления аппаратной.

Система заземления электрических сетей переменного тока 0,38 кВ в помещении аппаратной должна удовлетворять требованиям TN-S системы, т.е. не допускается применение объединенного защитного и нулевого рабочего PEN-проводника.

Заземление устройств оборудования обработки информации выполняют в соответствии с ГОСТ Р 50571.5.54–2013 и ГОСТ Р 50571.22–2000.

#### **13.3.4. Заземление КРУЭ**

Для распределительных устройств с элегазовым оборудованием вследствие наличия в них более сложной электромагнитной обстановки большое значение имеет создание эквипотенциальной сети заземления или общей поверхности нулевого потенциала. Данная поверхность может представлять собой непрерывную стальную (медную) сетку, залитую бетоном, сетку или металлические пластины, расположенные на одном или нескольких уровнях.

В качестве сетки может применяться арматура железобетонной конструкции пола (при обеспечении электрического соединения арматуры между собой). Сетка присоединяется к закладным металлоконструкциям здания и к внешнему заземлителю равномерно по периметру. В здании выполняют систему уравнивания потенциалов.

По периметру помещения с оборудованием КРУЭ прокладывают заземляющую шину. Шина соединяется с закладными металлоконструкциями, оборудованием КРУЭ и высокочастотной (ВЧ) сеткой.

От ВЧ сетки для заземления оборудования КРУЭ оборудуют выводы, число которых должно быть не менее двух для каждого присоединения КРУЭ. Все оборудование КРУЭ соединяют между собой замкнутой шиной.

Корпус элегазового оборудования присоединяют к сети заземления у основания каждой опоры (кронштейна). Данные соединения выполняют при помощи не менее двух проводников.

На энергообъекте с несколькими КРУЭ разного класса напряжения, с КРУЭ и ОРУ заземляющее устройство вне КРУЭ выполняют в соответствии с п. 8.2 и 8.3 [37].

#### **13.3.5. Заземление шкафов и панелей**

Выполнение системы заземления как внутри шкафа, так и шкафа на релейном щите, состоит в том, чтобы создать эквипотенциальную плоскость, к которой подключаются короткими соединительными проводниками все устройства (шкафы). Такой эквипотенциальной плоскостью внутри шкафа может служить проводящая задняя стенка (или специальная металлическая плоскость, возможно сетчатой структуры), к которой присоединяются все корпуса устройств и отдельные крепежные элементы (например, «DIN-рейки»).

Все подвижные и неподвижные элементы должны иметь не менее 2-х связей друг с другом (в том числе каждый элемент внутренней перегородки, «DIN-рейки», двери). Соединение с общей эквипотенциальной плоскостью выполняют либо при помощи гибкой связи, либо при помощи надежного контакта (контактная поверхность, освобожденная от покрытия или неокрашенная). Длина соединительных проводников должна быть не более 25 см.

Двери должны иметь механизмы, обеспечивающие электрический контакт с корпусом в закрытом состоянии по всему периметру двери.

Присоединение к системе уравнивания потенциалов помещения осуществляют при помощи сварки или болтового соединения (предусмотреть оба варианта). Должно быть не менее 4 точек соединений.

Для заземления различных элементов, в том числе резервных жил вторичных цепей, должны быть предусмотрены шинки вдоль боковин, соединенные с корпусом шкафа.

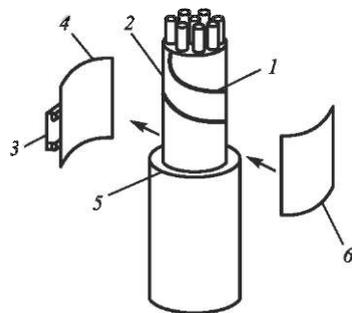
### 13.3.6. Заземление экранов кабелей

Практически на всех энергообъектах России применяются кабели типа КВВГЭ. Отсутствие правильной технологии заземления экранов таких кабелей и применяемые конструкции шкафов привели к тому, что применяемые на практике способы заземления экранов противоречат основным правилам обеспечения ЭМС. Как правило, заземление экранов выполняется в виде «косички».

«Косичка» — отрезок спаянных проводников оплетки кабеля или дренажные проводники кабелей с фольговыми экранами, являются удивительно неэффективными для обеспечения хорошего заземления, даже если их длина не превышает 25 мм. Косички увеличивают последовательную индуктивность в заземляющем соединении, которая будет доминировать в передаточном сопротивлении при сборке. Взаимная индуктивность отрезка кабеля, на котором выполнена косичка, пропорциональна длине отрезка; для косички длиной 25 мм взаимная индуктивность составляет несколько наногенри, что существенно больше, чем допускается для индуктивности утечки типичного экранированного кабеля.

Соединение «косичкой» не может быть рекомендовано для обеспечения ЭМС, за исключением низкочастотных приложений, не представляющих опасность с позиции помехоэмиссии и восприимчивости. В любом случае длина косички не должна превышать 30 мм.

Для заземления экранов рекомендуется использовать специальную конструкцию в виде специальных зажимов (рис. 13.8, 13.9) с большой площадью контакта. Ее можно расположить по всему периметру нижней части шкафа. Для большего числа кабелей, возможно, установка дополнительного ряда в середине (если это возможно по условиям удобства монтажа).

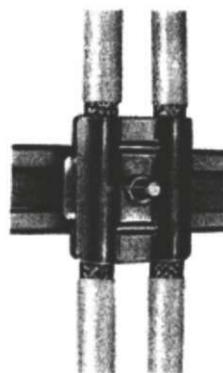
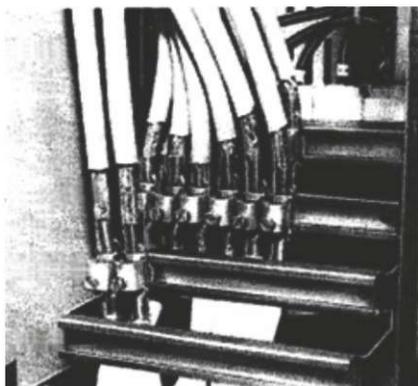


**Рис. 13.8. Заземление экрана кабеля типа КВВГЭ:**

1 — медная жила; 2 — экран кабеля (фольга); 3 — DIN-рейка;

4 — внутренняя часть зажима; 5 — изоляция кабеля;

6 — наружная часть зажима



**Рис. 13.9. Заземление экранов с помощью специальных зажимов**

Основное правило – экраны контрольных и силовых кабелей следует заземлять с обоих концов. Этот способ является наилучшим для снижения синфазных помех, особенно на средних и высоких частотах. Коэффициент снижения остается значительным (т.е.  $\ll 1$ ) и на низких частотах, если при этом в состав экрана входят магнитные материалы (сталь, пермаллой, феррит).

Частные случаи – двойное экранирование кабелей, заземление через емкость или устройство защиты от перенапряжений.

Иногда можно объединить преимущества посредством использования:

- кабелей с двойным экранированием, при этом с двух сторон заземлять только внешний экран;
- кабелей с одинарным экраном, у которого один конец заземляется непосредственно, а другой через конденсатор (для предотвращения циркуляции токов низкой частоты) или через устройство защиты от перенапряжений для того, чтобы по экрану протекали частично только токи КЗ или токи молнии.

Каждый способ заземления соответствует некоторому четко определенному набору ситуаций, привязанных к различным типам обычно используемых на энергообъектах полезных сигналов, см. также [38] приложение Е. Электромагнитная обстановка оказывает влияние на оборудование непосредственно или, что бывает чаще, через кабели. В последнем случае уровень помех и порог невосприимчивости зависят, в основном, от двух факторов: типа кабеля и способа подключения; типа передаваемого сигнала. Первый фактор характеризуется коэффициентом экранирования. Второй фактор может быть охарактеризован видом сигналов (цифровые или аналоговые), амплитудой (в вольтах или амперах) и частотным диапазоном.

Классификация сигналов, состоящая из четырех классов, размещенных в порядке убывания чувствительности к электромагнитным возмущениям, приведена в табл. 7.6. Следует отметить, однако, что хотя в данной классификации цифровые и аналоговые сигналы отнесены к одному типу (различаясь индексами а и б соответственно), подобное сравнение имеет некоторые ограничения вследствие того, что цифровые и аналоговые системы на практике ведут себя совершенно по-разному (см. также [38], приложение Е).

## 13.4. Кабельная канализация

### 13.4.1. Общие положения

На энергообъектах различают по функциональному назначению следующие основные виды кабелей:

- контрольные кабели (цепи вторичной коммутации);
- кабели связи;
- кабели для питания постоянным и переменным током электроприводов силового оборудования;
- силовые кабели 6–500 кВ;
- кабели собственных нужд (освещение, сварочные посты и т.д.);
- кабели видеонаблюдения, охранной и пожарной сигнализации.

Количество кабелей, их протяженность и трасса прокладки по территории РУ зависят от компоновки РУ, состава и количества оборудования.

Для прокладки кабелей на территории ОРУ применяют кабельные каналы, лотки (железобетонные и металлические), коробка, трубы, кабельные эстакады; осуществляется также прокладка кабелей в земле.

Проектирование и монтаж кабельной канализации на электросетевых объектах осуществляют в соответствии с нормативными документами: ПУЭ (гл. 2), СНиП 3.05.06–85 «Электротехнические устройства» и методическими указаниями, разработанными ведущими проектными организациями (ЭСП, ТЭП и др.).

Условия ЭМС должны быть выполнены для всех видов (по назначению) вторичных кабелей.

Уровни наведенных импульсных помех при ударах молнии в молниеотводы, коммутациях и КЗ в первичных цепях зависят от расположения трассы прокладки вторичных кабелей по отношению к первичным цепям и молниеотводам, типа кабельной канализации (лотки, каналы, тоннели) и типа кабелей (с экраном, металлической оболочкой, броней).

Трассы вторичных кабелей следует прокладывать по возможности перпендикулярно шинам первичных цепей на максимальном удалении от шин первичных цепей и молниеотводов.

Коэффициент экранирования от импульсных электромагнитных полей повышается при прокладке кабелей в кабельных каналах или туннелях. Наибольший эффект экранирования достигается при прокладке кабелей ниже уровня прокладки горизонтальных заземлителей.

При разработке проектного решения по кабельной канализации (трасса прокладки, тип кабельной канализации, тип кабелей) исходят из того, чтобы возможный уровень импульсных помех не превышал допустимых значений по уровням (электрической прочности изоляции и помехоустойчивости вторичного оборудования). Приближенные оценки делают на основании данных, приведенных в табл. 13.2. Для проектируемой кабельной канализации окончательное решение принимают после проведения расчетов с помощью компьютерной программы.

Если при техперевооружении используют существующую кабельную канализацию, то определение выполнения условий ЭМС осуществляют при проведении обследования на этапе предпроектных изысканий в соответствии с [40].

### 13.4.2. Методика расчета импульсных помех, наводимых во вторичных цепях при коротких замыканиях и коммутациях в первичных цепях

Расчеты импульсных помех во вторичных цепях (при коммутациях и КЗ в первичных цепях) проводят с помощью расчетной компьютерной программы.

Необходимыми исходными данными для расчетного определения импульсных помех, обусловленных переходными процессами в первичных цепях, являются: электрическая оперативная схема электросетевого объекта; удельное сопротивление грунта (геоэлектрический разрез); план расположения первичного оборудования, высота подвеса ошиновки высокого напряжения; состав, расположение вторичного оборудования и план кабельных связей с силовым оборудованием, первоначальное проектное решение по кабельной канализации.

В расчетной программе моделируют нормальную оперативную схему первичных цепей при помощи емкостей оборудования на землю и ошиновки, а также вторичные кабели, проложенные по кабельным трассам от силового оборудования до релейного щита или другого помещения с вторичным оборудованием.

В расчетной модели допускается рассматривать одну фазу первичных цепей, ближайшую к кабельным трассам. Вторичные кабели располагают на поверхности земли без экрана. На ошиновке и оборудовании задают в номинальное амплитудное фазное напряжение.

В схеме замещения первичной цепи (в узле) моделируют КЗ и проводят расчет переходного процесса. Определяют амплитудно-частотные характеристики импульсных токов в первичных цепях и наибольшее расчетное значение напряжения, воздействующее на изоляцию кабелей и входы вторичного оборудования. Расчет проводят для нескольких точек КЗ, определяя наиболее опасный случай. Как правило, достаточно провести расчет для 4-5 точек КЗ.

Рассчитанные значения наведенных импульсных напряжений в кабелях пересчитывают с учетом коэффициента экранирования. Амплитуда импульсных напряжений обратно пропорциональна коэффициенту экранирования. Общий коэффициент экранирования получают перемножением коэффициентов отдельных элементов.

Приближенные наименьшие значения коэффициентов экранирования приведены в табл. 13.9. Более точные значения, с учетом частотных характеристик импульсных токов в первичных цепях, получают по зависимостям, приведенным на рис. 13.10–13.17 или расчетом.

Таблица 13.9

#### Коэффициенты экранирования кабелей и кабельных конструкций

Кабельная конструкция	Минимальный коэффициент экранирования, о.е.
Неэкранированный кабель, экранированный кабель с заземлением экрана с одной стороны.	1
Экранированный кабель с заземлением экрана с двух сторон	10
Железобетонный лоток по поверхности земли	1
Цельнометаллический, электрически непрерывный кабельный короб	4
Полузаглубленный и подземный кабельный канал	10
Кабельный тоннель	20

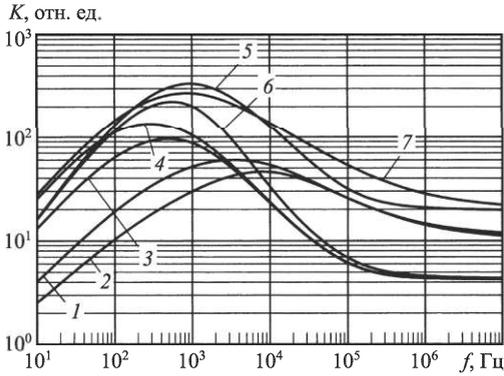


Рис. 13.10. Сравнительные коэффициенты экранирования различных экранирующих элементов

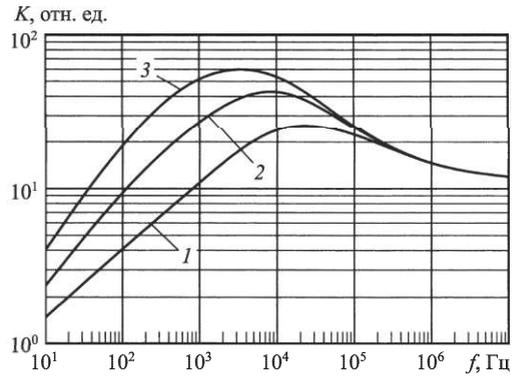


Рис. 13.11. Коэффициенты экранирования кабельных экранов

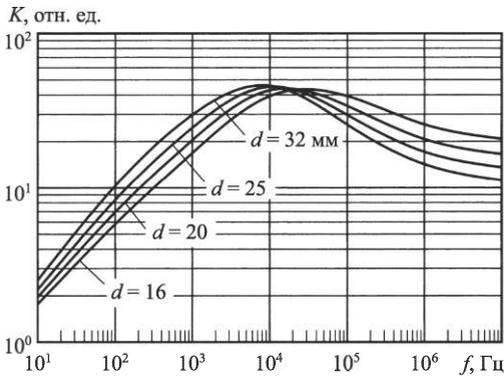


Рис. 13.12. Коэффициенты экранирования металлорукавов различного диаметра

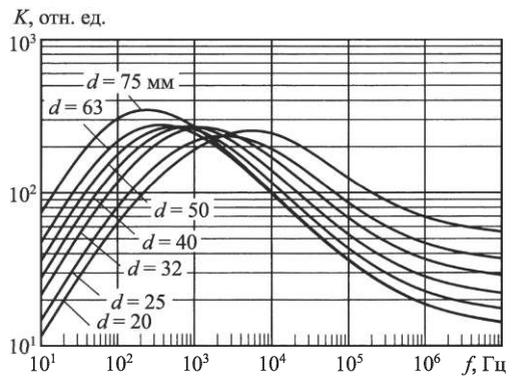


Рис. 13.13. Коэффициенты экранирования стальных толстостенных труб различного диаметра

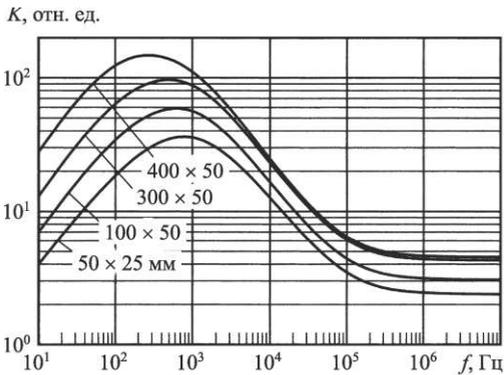


Рис. 13.14. Коэффициенты экранирования стальных лотков различного сечения

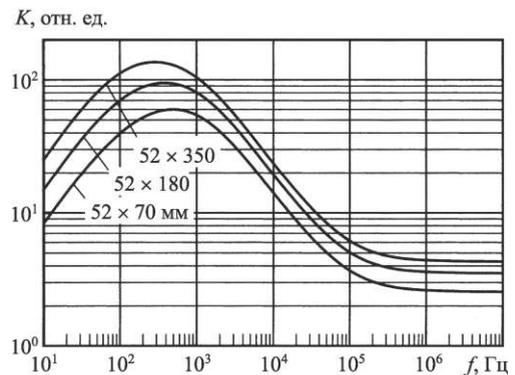
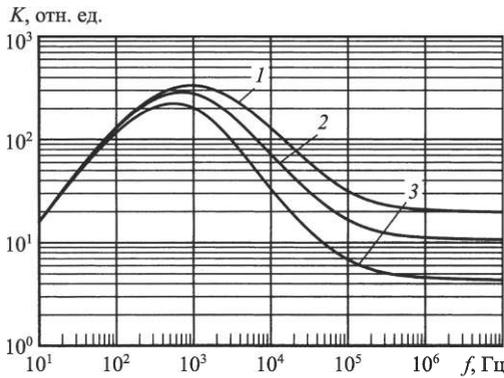
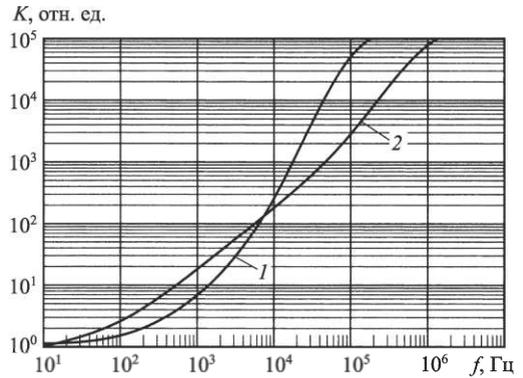


Рис. 13.15. Коэффициенты экранирования стальных коробов различного сечения



**Рис. 13.16. Коэффициенты экранирования железобетонных каналов и лотков (при обеспечении непрерывности электрического соединения)**



**Рис. 13.17. Коэффициенты экранирования металлических шкафов**

Коэффициенты экранирования стен зданий приведены в табл. 13.10.

Таблица 13.10

### Коэффициенты экранирования стен зданий

Вид здания	Кирпичное	С металлическим каркасом	Из сборного железобетона
Коэффициент экранирования на частоте 25 кГц	3	10	30
Коэффициент экранирования на частоте 1 МГц	3	8	20

При определении наибольшего возможного уровня помех учитывают помехи, передающиеся на входы оборудования из-за подъема импульсного потенциала на ЗУ.

Расчеты помех при коммутациях в первичных цепях выполняют аналогично КЗ. В программе задают операции включения и отключения выключателей и разъединителей. Рассматривают все виды коммутаций, возможные в данной схеме. Наиболее распространенными являются:

- включение (отключение) разъединителя (при отключенном выключателе);
- включение (отключение) выключателя – подача (снятие) напряжения на присоединение или обходную систему шин.

При разработке проекта техперевооружения действующего электросетевого объекта на этапе предпроектных изысканий допускается определение уровня импульсных помех при коммутациях и КЗ экспериментально (натурные или имитационные эксперименты).

Расчетные значения импульсных напряжений сравнивают с допустимым значением для аппаратуры и, тем самым, проверяют выполнение требований ЭМС.

Если требования ЭМС не выполняются (расчетные значения выше допустимых), то для снижения уровня импульсных помех в кабельных линиях применяют какое-либо из ниже указанных мероприятий по снижению уровня импульсных помех.

Дополнительное экранирование кабельных трасс:

- применение кабелей с более высоким коэффициентом экранирования;
- применение кабельных лотков, обеспечивающих дополнительное экранирование (с встроенной сеткой или цельнометаллические);
- прокладка кабелей в трубах, бронешлангах.
- Удаление от ошиновки РУ:
- размещение ниже поверхности земли (в кабельных каналах);
- увеличение расстояния (в плане) между отдельными участками кабельной трассы и параллельным им участками ошиновки (системы шин или ошиновки Т, АТ, конденсаторов);
- изменение направления трассы таким образом, чтобы большая часть ее проходила перпендикулярно (в плане) ошиновке;
- применение глубоких кабельных коммуникаций (заглубленные каналы, тоннели);
- использование специальных кабельных трасс, проходящих в обход РУ или перпендикулярно ошиновке, для отдельных цепей (локальная компьютерная сеть, интерфейсы связи пожарной сигнализации, цепи технологического видеонаблюдения).

Могут быть выставлены специальные требования производителям аппаратуры по увеличению уровня помехоустойчивости устройств.

При наличии двух (или более) возможных трасс следует выбирать ту, которая располагается дальше (в плане) от ошиновки. При этом наибольшего отдаления следует добиваться (в порядке уменьшения влияния) от параллельно идущих систем шин, ошиновки трансформаторов, автотрансформаторов, других наиболее протяженных отрезков ошиновки. Из двух одинаковых трасс следует выбирать трассу, которая на большей протяженности расположена перпендикулярно ближайшим отрезкам ошиновки.

При прокладке вторичных кабелей по территории РУ необходимо применять кабели с экраном, металлической оболочкой или броней. Применение неэкранированных кабелей должно быть обосновано расчетом.

Установка устройств по ограничению импульсных перенапряжений во вторичных цепях применяется в исключительных случаях. Выбор таких устройств и решение об их применении осуществляют на основании специальной разработки. При выполнении проекта установки устройств по ограничению импульсных перенапряжений необходимо показать, что устанавливаемые устройства не влияют на полезный сигнал и не снижают надежности работы вторичного оборудования. Также должны быть даны указания по обслуживанию устройств в эксплуатации.

Прокладку контрольных и силовых кабелей по общей трассе рекомендуется выполнять на определенном расстоянии. Допустимое расстояние зависит от типа, назначения кабельных линий и определяется расчетом.

Рекомендуется прокладывать контрольные кабели на расстоянии не менее: 0,25 м – до силовых кабелей 0,4 кВ, ток КЗ в которых не превышает 1 кА, не используемых для питания потребителей на молниевыводах; 0,6 м – до других силовых кабелей до 1 кВ; 1,2 м – до силовых кабелей выше 1 кВ.

### 13.5. Молниезащита

Молниезащитные устройства на энергообъектах обеспечивают защиту оборудования, зданий и сооружений от прямых ударов молнии. Электромагнитное воздействие молнии на вторичное оборудование определяют при ударах молнии в молниевыводы.

Нормируемыми параметрами при определении уровней электромагнитных воздействий молнии являются:

- напряженность импульсного магнитного поля в местах размещения вторичного оборудования;
- напряжение на токоотводах и ЗУ молниесотводов в местах прокладки вторичных кабелей;
- наведенные во вторичных цепях импульсные напряжения.

Наибольшее значение напряженности импульсного магнитного поля в местах размещения вторичного оборудования не должно превышать 300 А/м.

Наибольшее напряжение на токоотводах и ЗУ молниесотводов по отношению к вторичным кабелям не должно превышать значения напряжения электрического пробоя с токоотводов и ЗУ на кабели. Среднюю напряженность электрического пробоя в грунте принимают 300 кВ/м, а в воздухе – 500 кВ/м. Напряженность электрического пробоя по поверхности земли принимают 100 кВ/м.

При прохождении трассы вторичных кабелей вблизи молниесотводов возможен пробой изоляции кабелей из-за высокого потенциала на поверхности земли. Среднюю напряженность электрического пробоя изоляции кабелей принимают в соответствии с данными производителя (например, для кабелей типа КВВГ не более 15 кВ/мм).

Наибольшее значение импульсного потенциала, выносимого по ЗУ в точки заземления вторичных цепей (цепи тока и напряжения), не должно превышать испытательное напряжение (с учетом коэффициента ослабления при прохождении импульса от РУ до РЩ) вторичного оборудования. Коэффициент ослабления определяется расчетом с помощью компьютерной программы. Для вторичных цепей, которые не заземляются на территории РУ, импульсный потенциал не должен превышать 10 кВ. Наименьшее значение коэффициента ослабления для таких цепей принимают равным 10.

Наведенные от молнии импульсные напряжения во вторичных цепях не должны превышать значений испытательных напряжений вторичного оборудования на помехоустойчивость.

Нормируемые параметры тока молнии для принятых уровней надежности защиты приведены в табл. 13.11 и 13.12.

Таблица 13.11

### Параметры тока положительной молнии

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимальное значение $I_m$ , кА	200	150	100
Длительность фронта $T_1$ , мкс	10	10	10
Длительность импульса $T_2$ , мкс	350	350	350
Заряд $Q_s$ , Кл	100	75	50
Удельная энергия $W/R$ , МДж/Ом	10	5,6	2,5

Для энергообъектов в соответствии с [43] рекомендуется принимать уровень надежности защиты IV. Для зданий и сооружений, расположенных на объекте, по условиям взрыво- и пожароопасности, а также по требованиям надежного функционирования объекта могут быть приняты более высокие уровни надежности защиты.

### Параметры повторных импульсов тока отрицательной молнии

Параметры тока	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимальное значение $I_m$ , кА	50	37,5	25
Длительность фронта $T_1$ , мкс	0,25	0,25	0,25
Длительность импульса $T_2$ , мкс	100	100	100
Средняя крутизна $di/dt$ , кА/мкс	200	150	100

Необходимые исходные данные для определения наводимых во вторичных цепях импульсных помех и потенциалов на ЗУ при ударах молнии в молниеотводы:

- характеристики электрической структуры грунта;
- план расположения молниеотводов, зданий и сооружений на территории электросетевого объекта;
- сведения о кабельной канализации (трасса, тип кабелей, вид кабельной канализации).

Данные об электрической структуре грунта определяют в ходе предпроектных изысканий.

При выполнении проекта реконструкции (техпереворужения) энергообъекта на этапе предпроектных изысканий определяется исполнительная схема заземляющего устройства.

Расстояния от молниеотводов (токоотводов) до места установки вторичного оборудования по условию воздействия импульсных магнитных полей определяются с помощью компьютерной программы или приближенно по выражению:

$$L > I_m / (2\pi H_{\text{доп}} K_{\text{экр}}),$$

где  $L$  – безопасное расстояние от молниеприемника или токоотвода до места установки вторичного оборудования (м);  $I_m$  – ток молнии (А);  $H_{\text{доп}}$  – допустимая для оборудования напряженность импульсного магнитного поля;  $K_{\text{экр}}$  – коэффициент экранирования (ослабления поля).

Коэффициент экранирования определяют по зависимостям, приведенным на рис. 13.10–13.17.

В тех случаях, когда для принятых проектных решений уровни импульсных магнитных полей превышают допустимые значения, изменяют место размещения молниеотводов (токоотводов) или выполняют дополнительное экранирование помещений.

Расстояния от молниеотводов до кабельных коммуникаций определяют из условия, что импульсные помехи при ударах молнии, наводимые во вторичных цепях, не будут превышать допустимые уровни.

Расчеты помех проводят с помощью компьютерной программы. Амплитуда наведенных импульсных напряжений обратно пропорциональна коэффициенту экранирования. Общий коэффициент экранирования получают перемножением коэффициентов экранирования отдельных элементов. Значения коэффициентов экранирования получают по зависимостям, приведенным на рис. 13.10–13.17 или расчетом.

Для снижения уровня импульсных помех применяют одно из следующих мероприятий: изменяют трассу прокладки вторичных кабелей или место размещения молниеотводов (токоотводов); принимают меры по увеличению коэффициента экранирования кабельной канализации (прокладка в кабельных каналах, металлических коробах или трубах, применяют кабели с более высоким коэффициентом экранирования); устанавливают во вторичных цепях устройства ограничения импульсных перенапряжений.

Устройства по ограничению импульсных перенапряжений во вторичных цепях применяют в исключительных случаях. Выбор таких устройств и решение об их применении осуществляют на основании специальной разработки.

Расчеты потенциалов на ЗУ при ударе молнии в молниеотвод проводят с помощью компьютерной программы. При разработке проекта техперевооружения распределение потенциалов на ЗУ может определяться на этапе предпроектных изысканий экспериментально методом имитационного моделирования в соответствии с [40].

В тех случаях, когда для принятых условий не выполняются требования по уровням импульсных помех или по условию обратного перекрытия с ЗУ на кабели, применяют одно из указанных ниже мероприятий:

- снижают импульсное сопротивление ЗУ молниеотвода, прокладывая дополнительно заземлители и заземляющие проводники;
- изменяют трассу прокладки вторичных кабелей;
- изменяют места размещения молниеотводов (токоотводов).

После реализации указанных мероприятий повторно проводят расчеты.

Для защиты от вторичных воздействий молнии при применении в качестве молниеприемника сетки на зданиях используют металлические конструкции зданий в качестве токоотводов, заземляющих проводников и заземлителей системы молниезащиты.

Для зданий с железобетонными конструкциями необходимо максимально использовать естественные элементы: в качестве молниезащитных заземлителей использовать железобетонные фундаменты зданий и внешние заземлители электросетевого объекта; в качестве токоотводов использовать стальные каркасы зданий (стальные колонны, фермы и балки); молниеприемную часть зданий выполнить из искусственных молниеприемников в виде «сетки» и (или) стержневых молниеприемников в соответствии с требованиями нормативных документов. Обеспечивать электрическую непрерывность стального каркаса и фундамента здания необходимо следующими способами:

- не менее 50 % соединений арматурных стержней фундамента между собой выполнить сваркой или вязкой проволокой;
- выполнить сварочное соединение всех стальных колон здания с арматурой его железобетонного фундамента;
- выполнить сварочное или болтовое соединение всех стальных колон здания с расположенными под крышей поперечными фермами;
- выполнить сварочное или болтовое соединение поперечных ферм с продольными балками.

Если в здании применяются не стальные, а железобетонные колонны, то в каждой колонне по всей ее высоте необходимо обеспечить электрическую непрерывность не менее двух арматурных стержней, которые следует присоединять к арматуре фундамента и фермам. Часть расположенных по периметру здания стальных колонн присоединить проводниками к внешнему заземлителю электросетевого объекта. Среднее расстояние между присоединяемыми к заземлителю колоннами должно быть не более 20 м. Соединить горизонтальные молниеприемные проводники, прокладываемые

по периметру крыши, с колоннами здания. Расстояние между точками присоединений – не более 20 м.

Гидроизоляцию фундамента здания выполняют битумными или битумно-латексными покрытиями. Применение полимерных покрытий при использовании фундамента здания в качестве молниезащитного заземлителя не допускается.

При наличии нескольких зданий, между которыми проложены вторичные кабели, необходимо прокладывать дополнительные заземлители (параллельные заземляющие проводники) для снижения разности потенциалов на ЗУ и токовой нагрузки на экраны кабелей. Шаг сетки из заземлителей (количество параллельных проводников) определяется расчетом.

Для кирпичных зданий выполняют искусственную систему уравнивания потенциалов. Выбор количества и сечения проводников определяют расчетом.

На всех этажах обеспечивают соединения металлических конструкций зданий с внутренней системой уравнивания потенциалов, а на отметке 0 м – соединения с внешним заземляющим устройством.

В местах установки антенн и другого оборудования на крыше здания предусматривают выводы для заземления оборудования. Все кабели, выходящие на крышу, прокладывают в стальных трубах.

Для защиты кабелей от вторичных проявлений тока молнии применяют экранированные кабели с заземлением экранов с двух сторон. Прокладку кабелей в пределах здания осуществляют в оцинкованных кабельных коробах, прокладку кабелей между зданиями рекомендуется осуществлять в подземных кабельных каналах или тоннелях.

При установке антенной мачты на энергообъекте должны быть выполнены мероприятия по защите от вторичных воздействий молнии системы связи и вторичного оборудования.

Выбор места расположения мачты и выполнение ЗУ определяются на основании расчетов распределения токов и потенциалов на ЗУ, наведенных напряжений в кабелях, а также импульсных магнитных полей в местах расположения вторичного оборудования.

Кабели связи и электропитания от антенной мачты прокладывают в стальных трубах, присоединенных к ЗУ. На входе кабелей в здание устанавливают устройства защиты от импульсных перенапряжений.

Для защиты от электромагнитных воздействий молнии аппаратура радиосвязи может быть размещена рядом с радиомачтой в отдельном металлическом контейнере. Внутри контейнера выполняют систему уравнивания потенциалов и устанавливают устройства защиты от импульсных перенапряжений в кабелях связи и в цепях электропитания. Стенки контейнера должны обладать достаточными экранирующими свойствами.

Связь между аппаратурой в контейнере и вторичным оборудованием в других зданиях и сооружениях рекомендуется осуществлять оптоволоконным кабелем. В случае использования проводных цепей обмена информацией их следует снабжать устройствами защиты от перенапряжений.

### **13.6. Система оперативного постоянного тока**

Питание устройств РЗА должно осуществляться по отдельным распределительным линиям (фидерам) по радиальной схеме.

Защитные коммутационные аппараты должны иметь быстроедействие, достаточное для того, чтобы при возникновении КЗ на любой из распределительных линий не допустить провалы напряжения на шинах ЩПТ более, чем указано в табл. 13.13.

## Мероприятия по улучшению качества электрической энергии

Показатели качества электроэнергии	Основная причина ухудшения	Рекомендуемое мероприятие
Установившееся отклонение напряжения	Неправильный выбор регулировочного ответвления трансформатора	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Регулирование напряжения в центре питания или у потребителя путем переключения на соответствующее ответвление трансформатора.</li> <li>2. Снижение потерь напряжения в элементах сети</li> </ol>
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент $n$ -й гармонической составляющей	Потребители, представляющие собой нелинейную нагрузку	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин.</li> <li>2. Использование фильтровых устройств (узкополосных резонансных фильтров, фильтрокомпенсирующих и фильтросимметрирующих устройств).</li> <li>3. Применение специального оборудования («венасыщающихся» трансформаторов, многофазных преобразователей с улучшенными энергетическими показателями)</li> </ol>
Колебания напряжения	Резкие изменения мощности нагрузки (в основном реактивной)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Применение быстродействующих источников реактивной мощности (ИРМ).</li> <li>2. Разделения нагрузки (с помощью сдвоенных реакторов, трансформаторов с расщепленной обмоткой и т.д.)</li> </ol>
Коэффициент несимметрии по обратной или нулевой последовательности	Использование однофазных нагрузок большой мощности	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Симметричное распределение однофазных нагрузок между фазами.</li> <li>2. Применение симметрирующих устройств или схем симметрирования</li> </ol>
Провалы или прерывания напряжения	Аварийные ситуации, ошибки персонала и ложные срабатывания защит, отключения из-за перегрузок	Применение для ответственных потребителей систем гарантированного бесперебойного электропитания на базе ИБП и дизельных электростанций
Импульсные помехи высокого уровня, перенапряжения	Коммутационные процессы, грозовая деятельность	Организация на объекте многоступенчатой защиты от перенапряжений

СОПТ должна иметь защиту от коммутационных перенапряжений и импульсных помех. В качестве защитных аппаратов рекомендуется устанавливать в ЩПТ между каждым полюсом и «землей» кремниевые диоды (номинальный ток не менее 160 А, ток утечки менее 1 мА) или устройства защиты от импульсных перенапряжений.

Распределительные и групповые линии, используемые для питания устройств РЗА, установленных в распределительных устройствах (КРУЭ, ОРУ, КРУ), должны выполняться экранированными кабелями. Применение неэкранированных кабелей должно быть обосновано расчетом.

Не рекомендуется подключать к одной панели (сборке) ЩПТ цепи питания электроприемников, чувствительных к перенапряжениям и высокочастотным помехам (микропроцессорные устройства, устройства связи и т.п.) и цепи, выходящие за пределы помещения (цепи приводов включения/отключения высоковольтных выключателей).

Сборки питания устройств РЗА должны иметь отдельные вводы от АБ, независимые от цепей питания других электроприемников. Использование общих защитных коммутационных аппаратов для цепей питания устройств РЗА и цепей приводов включения/отключения высоковольтных выключателей и других силовых электроприемников недопустимо.

Размещение АБ и ЩПТ должно обеспечивать применение соединяющих их кабелей минимальной длины. Следует избегать прокладки кабелей разных полюсов на большом расстоянии друг от друга.

Пульсации напряжения на выходе подзарядного устройства должны быть не более 10 % от номинального напряжения. Эмиссия радиопомех подзарядного устройства не должна превышать значений, указанных в [37], табл. Б1, п. 26.

Для защиты от наносекундных импульсных помех применяют поочередно следующие технические решения:

- выполняют развязку по питанию (разные фидеры) электромеханических и микропроцессорных устройств;
- используют соответствующие защитные схемы (RC-цепочки, диоды, варисторы);
- применяют экранированные кабели.

### **13.7. Система электропитания переменным током**

В системе электроснабжения собственных нужд энергообъекта должны быть выделены следующие виды потребителей ЭЭ, чувствительных к электромагнитным помехам:

- компьютеры;
- АСУ ТП и устройства телемеханики;
- системы связи.

Электропитание указанных видов нагрузки должно быть выполнено посредством отдельных распределительных линий (фидеров).

Для электропитания АСУ ТП, телемеханики и других ответственных потребителей необходимо использовать инверторы, источники бесперебойного питания с двойным преобразованием и фильтрами для подавления высокочастотных и импульсных помех.

Для защиты электроприемников системы электроснабжения сети 0,4кВ от импульсных помех могут быть установлены устройства защиты от импульсных перенапряжений в соответствии с ГОСТ Р 50571-4-44–2011 (МЭК 60364-4-44:2007).

Система заземления электрических сетей переменного тока 0,4 кВ вторичного оборудования и устройств связи должна удовлетворять требованиям ПУЭ для TN-S системы, т.е. не допускается применение объединенного защитного и нулевого рабочего PEN-проводника.

Во избежание воздействия, вызванного магнитными полями токов силовых кабелей сети переменного тока, необходимо их прокладывать на расстоянии не менее 100 мм от контрольных кабелей и проводников СОПТ (ОСТН 600–93, п. 2.1096).

Для обеспечения ЭМС системы электроснабжения 0,4 кВ необходимо выполнение требований, предъявляемых к качеству электроэнергии по ГОСТ 32144–013 в соответствии с помехоустойчивостью вторичного оборудования.

В табл. 13.13 приведены показатели качества электроэнергии, основные причины, приводящие к их ухудшению и рекомендуемые мероприятия по их улучшению.

При проведении приемо-сдаточных испытаний необходимо выполнить измерения качества электропитания 0,4 кВ.

### **13.8. Защита от электромагнитных полей радиочастотного диапазона**

На этапе предпроектных изысканий проводят измерения полей радиочастотного диапазона от внешних источников в месте размещения электросетевого объекта.

Исходными данными являются:

- мощность и частотный диапазон переносных и стационарных радиопередающих станций, которые применяют на электросетевом объекте;
- данные о строительных конструкциях зданий;
- тип шкафов.

Место расположения стационарных устройств связи, применяемых на объекте, необходимо выбирать (на основании расчетов) таким образом, чтобы уровень напряженности электромагнитного поля в месте размещения вторичного оборудования не превышал допустимых значений.

Для переносных радиопередающих устройств необходимо устанавливать ограничения (в зависимости от мощности устройства) по использованию их в местах расположения вторичного оборудования.

Если по результатам предпроектных изысканий уровни напряженности радиочастотных электромагнитных полей от внешних источников, с учетом естественных экранов, выше допустимых значений, необходимо применять дополнительное экранирование:

- зданий/помещений, в которых размещается вторичное оборудование;
- вторичного оборудования.

Один из наиболее простых и низкочастотных способов экранирования от высокочастотных полей – это закладка в стены здания сетки из стальных прутьев (диаметром около 5 мм) с шагом 10–15 см, причем каждый прут на концах присоединяется к соседним. При подобном выполнении может быть достигнут коэффициент затухания магнитного поля от 15 до 30 дБ в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц; он зависит от качества выполнения соединений между прутьями, между прутьями и металлоконструкциями и наличия строительных проемов (окон, дверей, и т.п.). Другой низкочастотный способ экранирования – это применение сетки из тонкой проволоки. Вся внутренняя поверхность помещений должна быть закрыта сеткой. При этом должен быть выполнен надежный электрический контакт по периметру между листами сетки, а также с элементами системы уравнивания потенциалов.

Металлические шкафы без отверстий обеспечивают экранирование от электромагнитных полей радиочастотного диапазона до допустимых уровней. Размеры допустимых отверстий зависят от частоты воздействующего поля, расстояния элементов аппаратуры от отверстия и т.п.

В качестве ориентировочных оценок принимают, что любая неоднородность в виде окон, щелей и т.п. допустима, если ее наибольшие линейные размеры не превышают десятой части минимальной длины волны воздействующего поля. Например, для 1 ГГц

(диапазон сотовых телефонов) минимальные допустимые размеры отверстия составляют 30 мм, для 500 МГц (диапазон радиопереговорных устройств) – 60 мм.

Для экранирования смотровых отверстий применяют специальные стекла: с проводящей пленкой или с армированием металлической сеткой.

### 13.9. Защита от магнитных полей промышленной частоты

Если обеспечить допустимые уровни напряженности магнитного поля в местах размещения вторичного оборудования за счет компоновки объекта невозможно, применяют технические решения по экранированию источников магнитных полей или вторичного оборудования и кабелей.

Применение стальных решеток для экранирования обеспечит затухание магнитного поля низкой частоты лишь на нескольких дБ. Использование стальных пластин или листов более эффективно. Коэффициент экранирования зависит от толщины листа и магнитной проницаемости материала. При использовании стального листа толщиной 2,5 мм с относительной магнитной проницаемостью около 1000, образующего непрерывную магнитную цепь вокруг источника или приемника помех, величина коэффициента затухания составит от 10 до 20 дБ. Если магнитная цепь не замкнута, ее магнитное сопротивление остается значительным, а значение коэффициента не превышает 10 дБ.

Значительное улучшение экранирующих свойств может быть достигнуто при применении стали с ориентированной внутренней структурой, например, применяемой в трансформаторах.

На низких частотах обычно применяют экраны из материалов с большой магнитной проницаемостью. В табл. 13.14 приведены данные о материалах, применяемых для магнитных экранов.

Таблица 13.14

#### Материалы, применяемые для магнитных экранов

Название материала	Магнитная проницаемость, $\mu$ , о.е.
Мюметалл	19000
79 НМ (пермаллой)	25000
49 KF2VI (сталь)	8000

Помимо этих материалов, для магнитного экранирования применяют:

- фольгу из различных сплавов толщиной от 50 до 150 мкм (можно применять несколько слоев фольги);
- магнитный экран из лент аморфного металлического сплава (АМС), предназначенный для локального экранирования постоянных и переменных магнитных полей (представляет собой гибкий листовый материал типа «Рогожка» полотняного переплетения, изготовленный из лент АМС марки КНСР шириной 850–1750 мм, толщиной 0,02 – 0,04 мм);
- листы и ленты из металла с различными магнитными проницаемостями.

Характеристики изготавливаемых в России материалов с высокой магнитной проницаемостью приведены в ГОСТ 10160-75 «Сплавы прецизионные магнито-мягкие».

Экранирование информационных кабелей, кабелей систем охранной и пожарной сигнализации осуществляют путем их прокладки в толстостенных металлических трубах, присоединенных к ЗУ с двух сторон.

### 13.10. Защита от разрядов статического электричества

Для проведения расчетов электростатических потенциалов необходимо иметь данные о характеристиках напольного покрытия в помещении, где установлено вторичное оборудование, и возможный диапазон изменения влажности и температуры воздуха в помещении.

С помощью стандартной программы Mathcad рассчитывают потенциал оператора и сравнивают с допустимыми значениями. Максимальное установившееся значение потенциала оператора ( $U$ , В) определяется из выражения:

$$U = \frac{16j_0 h}{2\gamma_V \pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{(2m+1)(2n+1) \left( 1 + \frac{\gamma_S h}{\gamma_V} \left\{ \frac{\pi^2}{4} \left[ \left( \frac{2m+1}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{2n+1}{l_2} \right)^2 \right] \right\} \right)}$$

где  $j_0$  – плотность тока электризации [ $\mu\text{кА}/\text{м}^2$ ], которая в обычных условиях менее  $10 \mu\text{кА}/\text{м}^2$  [6],  $\gamma_S = 1/\rho_S$  [1/Ом] и  $\gamma_V = 1/\rho_V$  [1/Ом·м] – удельные поверхностная и объемная проводимости материала покрытия,  $l_1, l_2$  и  $h$  – размеры покрытия и его толщина [м].

Формулу можно использовать также для оценки потенциала оператора в случае, если он расположен на токопроводящем полу в различной обуви. Вместо параметров напольного покрытия ( $\gamma_V, \gamma_S, h, l_1$  и  $l_2$ ) в выражения подставляют параметры подошвы обуви. При расчетах используют экспериментальные зависимости  $\gamma_V$  и  $\gamma_S$  от относительной влажности воздуха  $\psi$  (%).

Для приближенных оценок можно воспользоваться данными табл. 13.15.

При проведении защитных мероприятий от СЭ следует руководствоваться требованиями ГОСТ 12.4.124–83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования».

Методы защиты от статического электричества, которые не позволяют накапливаться зарядам СЭ на диэлектриках и теле человека:

- увеличение относительной влажности воздуха в помещении до 65–75 %;
- применение антистатических линолеумов, настилов, ковриков, матов;
- использование персоналом антистатической одежды (халаты, куртки), антистатической обуви или полосок заземления, закрепляемых на любом типе обуви;
- заземление персонала с использованием кистевых браслетов с шарнирным контактом и заземляющим кордом, присоединяемым к заземляющему устройству.

Антистатические напольные покрытия, выпускаемые в настоящее время, подразделяют на три группы, в зависимости от их электрического сопротивления:

- антистатические или антистатика – сопротивление не более  $10^8 \text{ Ом}$ ;
- токорассеивающие или диссипативные – сопротивление от  $10^7$  до  $10^8 \text{ Ом}$ ;
- токопроводящие или электропроводные – сопротивление от  $10^5$  до  $10^6 \text{ Ом}$  (применяют во взрывоопасных помещениях).

При укладке этих покрытий необходимо четко руководствоваться рекомендациями производителя и использовать только указанные в техническом описании покрытия клеи (контактные или электропроводящие) и дополнительные материалы (медные ленты, присоединяемые к заземляющему устройству здания, зажимы, проводники и т.д.).

Таблица 13.15

**Данные о потенциалах статического электричества  
для различных напольных покрытий**

Характеристика напольного покрытия	Характеристика одежды и обуви оператора	Наибольший потенциал оператора, кВ	Степень жесткости испытаний для контактного воздушного разряда
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Синтетические одежда и обувь	30	X*/X
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Синтетическая одежда и кожаная обувь	30	X/X
Обычный (виниловый) линолеум	Синтетические одежда и обувь	15	X/4
Токопроводящие (бетонные) полы или антистатический линолеум	Синтетические одежда и обувь	12	X/4
Обычный (виниловый) линолеум	Синтетическая одежда и кожаная обувь	8	4/3
Токопроводящие (бетонные) полы или антистатический линолеум	Синтетическая одежда и кожаная обувь	6	3/3
Синтетическое покрытие (ковролин), покрытый лаком паркет	Хлопчатобумажная одежда и кожаная обувь	4	2/2
Обычный (виниловый) линолеум	–	2	1/1
Токопроводящие (бетонные) полы или антистатический линолеум	–	0,5	1/1

\* X – специальная степень жесткости испытаний, устанавливаемая Заказчиком по согласованию с производителем устройств.

Выбор средств защиты от статического электричества осуществляют на основании технико-экономических расчетов. В табл. 13.16 приведены сравнительные данные по затратам на напольные покрытия РЩ с площадью между рядами панелей (2 × 10) м<sup>2</sup>.

## Сравнительные данные по затратам на напольные покрытия

Используемые материалы и их характеристики	$U_{\text{max расч}}$ , кВ	Ориентировочные затраты, руб.
Бетонные полы без покрытия	Менее 6	10 000
Напольная плитка $10 \times 10 \text{ см}^2$ с токопроводящим (цементным) швом	Менее 6	50 000
Панельный фальшпол с антистатическим покрытием $\rho_V = 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	0,2	560 000
Антистатический линолеум «Tarket» $\rho_V = 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	0,020	160 000

### 13.11. Авторский надзор за выполнением проекта и приемо-сдаточные испытания

При проведении авторского надзора на этапе строительства и монтажа осуществляют контроль:

- соответствия объема работ проектной документации;
- качества работ при реализации технических решений по обеспечению ЭМС.
- выполнения требований по помехоустойчивости для всех возможных электромагнитных воздействий в соответствии с установленной степенью жесткости испытаний (по технической документации на вторичное оборудование и устройства связи);
- выполнения заземляющего устройства в соответствии с проектом и соблюдения условий ЭМС;
- обеспечения защиты от вторичных воздействий молнии;
- обеспечения защиты от импульсных помех;
- обеспечения защиты от статического электричества;
- обеспечения защиты от магнитных полей;
- выполнения требований ЭМС для системы электропитания постоянным и переменным током.

Если при проведении авторского надзора установлено, что условия ЭМС не выполняются в полном объеме, то осуществляют корректировку проекта.

Приемо-сдаточные испытания проводят на этапе пуско-наладочных работ.

Проводят диагностику заземляющего устройства и электромагнитной обстановки в соответствии с требованиями проекта.

Диагностику состояния заземляющего устройства проводят в соответствии с [17].

Проверяют соответствие ЗУ проектной документации и наличие актов приемки скрытых работ.

По результатам диагностики состояния заземляющего устройства оформляют соответствующие Протоколы, и составляют Паспорт на ЗУ.

Диагностику обеспечения ЭМС проводят в соответствии [40].

По результатам диагностики ЭМО составляют соответствующие Протоколы и делают Заключение о выполнении условий ЭМС для вторичного оборудования и систем связи. По всем видам электромагнитных воздействий.

Если при проведении приемо-сдаточных испытаний установлено, что условия ЭМС не выполняются в полном объеме, то разрабатывают и реализуют дополнительные технические решения в соответствии с выявленными дефектами.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Охарактеризуйте виды и уровни испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию вторичного оборудования и рекомендуемые степени жесткости испытаний.
2. Перечислите комплекс мероприятий по обеспечению заданной электромагнитной обстановки.
3. Назовите порядок разработки проектных решений по обеспечению ЭМС вторичного оборудования.
4. От каких условий зависит уровень помех во вторичном оборудовании?
5. Перечислите общие требования к заземляющим устройствам подстанций ВН.
6. Отличительные особенности заземления зданий и сооружений.
7. Заземления КРУЭ, экранов кабелей, шкафов и панелей.
8. Методика расчета импульсных помех во вторичных цепях.
9. Коэффициенты экранирования электромагнитных помех.
10. Расчетные нормируемые параметры тока молнии.
11. Технические мероприятия по защите систем оперативного тока и систем электропитания переменным током собственных нужд подстанции.
12. Как осуществляется защита от электромагнитных полей радиочастотного диапазона?
13. Как осуществляется защита от магнитных полей промышленной частоты?
14. Методы защиты от статического электричества.
15. Мероприятия по авторскому надзору за выполнением проекта и содержание приемо-сдаточных испытаний.

---

---

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

---

---

### 14.1. Основные положения

Определение ЭМО, характеризуемой наибольшими, но реально возможными электромагнитными воздействиями, в местах расположения АСТУ необходимо выполнять:

- при проверке обеспечения ЭМС АСТУ на действующих объектах;
- для определения мероприятий по обеспечению ЭМС АСТУ при разработке проектов реконструкции и техперевооружении энергообъектов;
- перед сдачей вновь строящегося или реконструируемого энергообъекта в эксплуатацию в рамках приемосдаточных испытаний;
- в порядке авторского надзора при строительстве нового или реконструкции действующего энергообъекта.

Достоверные результаты по ЭМО на энергообъекте могут быть получены лишь при сочетании экспериментальных и расчетных методов (натурные эксперименты, имитация электромагнитных воздействий). Натурные эксперименты на действующем объекте не могут воспроизвести все возможные режимы, например короткие замыкания на шинах РУ или удары молнии, а натурные коммутации силового оборудования, сопровождающиеся измерениями в цепях устройств АСТУ, ограничиваются по условиям работы энергообъекта разовыми экспериментами, как правило, не экстремальными с точки зрения уровней электромагнитных воздействий.

Опыты по имитации электромагнитных воздействий позволяют экспериментально существенно расширить возможности по выявлению наибольших уровней электромагнитных помех.

Натурные и имитационные эксперименты проводят на действующем объекте. Методика экспериментов и технические средства (например, имитаторы воздействий и измерительные приборы) предусматривают проведение работ по определению ЭМО таким образом, чтобы не нарушать нормальную работу энергообъекта и не повреждать устройства АСТУ

Комплексное сочетание натурных экспериментов с имитацией электромагнитных воздействий и численным анализом полученных результатов позволяет получить картину наиболее неблагоприятной ЭМО.

По результатам измерений и расчетов определяют требования по помехоустойчивости к аппаратуре, устанавливаемой на энергообъекте. Если уровень электромагнитных помех превышает уровень помехоустойчивости для аппаратуры, должны быть разработаны мероприятия по снижению уровня помех до допустимых значений.

## **14.2. Проведение измерений и расчетов по определению ЭМО**

Методика определения ЭМО на энергообъекте включает в себя следующие основные этапы:

- получение исходных данных об энергообъекте для проведения работ;
- экспериментально-расчетное определение ЭМО на объекте;
- определение соответствия между уровнями помехоустойчивости устройств АСТУ, установленных на объекте, и ЭМО в местах размещения этих устройств.

Для проведения экспериментальных работ создают рабочую программу (см. прил. 4). По результатам работ составляют технический отчет и оформляют протоколы результатов измерений и расчетов по всем указанным видам электромагнитных воздействий (см. прил. 5). В протоколах дается сопоставление возможных уровней воздействий на АСТУ с их помехоустойчивостью (см. прил. 6) и заключение об уровне электромагнитной совместимости, а также при необходимости дополнительные рекомендации по ее обеспечению.

### **14.2.1. Определение напряжений и токов промышленной частоты при коротких замыканиях на шинах распределительного устройства**

При КЗ на землю на шинах РУ в сетях с эффективно заземленной нейтралью наибольший ток промышленной частоты протекает по заземляющему устройству при однофазном (двухфазном) КЗ на землю. Потенциал на ЗУ при этом распределяется неравномерно. Если значение разности потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к оборудованию или устройствам АСТУ, возможно обратное перекрытие изоляции кабелей или устройств. Кроме того, ток КЗ, распределяясь по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей, вызовет повреждение кабелей, если будут превышены допустимые нагрузки по термической стойкости.

Ток КЗ на землю на шинах РУ в общем случае складывается из тока КЗ от трансформаторов/автотрансформаторов (Т/АТ) и тока КЗ от энергосистемы (см. рис. 13.6). От места КЗ ток возвращается в нейтраль Т/АТ и энергосистему через заземляющее устройство и непосредственно через землю.

Если в соответствии с методом суперпозиции рассмотреть распределение потенциалов на ЗУ при протекании тока КЗ от Т/АТ и распределение потенциалов при протекании тока от ЭНС, то получим суммарное распределение потенциалов (см. рис. 13.7).

В сетях с изолированной нейтралью протекание большого тока по ЗУ возможно при двойном замыкании на землю. В этом случае ток протекает от точки замыкания на землю одной фазы до точки замыкания на землю другой фазы. Распределение потенциалов на ЗУ будет аналогично тому, как при протекании тока от Т/АТ (см. рис. 13.6, 13.7).

Для того чтобы определить возможные уровни воздействующих на кабели АСТУ напряжений и токов при различных замыканиях на землю, проводят измерения распределения потенциалов и токов на заземляющем устройстве при имитации этих режимов.

Исходными данными для проведения измерений и расчетов напряжений и токов, воздействующих на контрольные кабели при КЗ на землю, являются:

- схема расположения оборудования с трассами прокладки кабелей цепей вторичной коммутации;
- расчетные значения токов однофазного и двухфазного КЗ на каждом из РУ 110 кВ и выше и токов двойного замыкания на РУ 6–35 кВ;
- удельное сопротивление грунта (геоэлектрический разрез).

Перед проведение имитации КЗ на землю (составляющая тока КЗ промышленной частоты) определяют исполнительную схему заземляющего устройства с помощью технических средств, указанных в приложении П.6 в соответствии с «Методическими указаниями по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525–00».

При составлении исполнительной схемы ЗУ особое внимание уделяют заземлению трансформаторов и автотрансформаторов, связям ЗУ зданий релейного щита (РЩ) и главного щита управления (ГЩУ) с основным заземлителем и связям между заземлителями РУ разного напряжения. Выявляют все возможные связи: через проводники заземлителя, броню, оболочки и экраны силовых и контрольных кабелей, трубы подачи сжатого воздуха и пожаротушения и т.п. Определяют поперечное сечение проводников заземлителя при выборочном вскрытии грунта не менее, чем в трех различных местах.

На основании полученной схемы прокладки проводников заземлителя выбирают оборудование, на котором при КЗ на землю ожидается наибольший потенциал. Такими местами являются (см. прил. 8) оборудование, присоединенное к сетке заземлителя наиболее длинными связями; оборудование, у которого выявлено отсутствие металлосвязи с основным заземлителем; оборудование, наиболее удаленное от места установки аппаратуры АСТУ (например, от релейного щита).

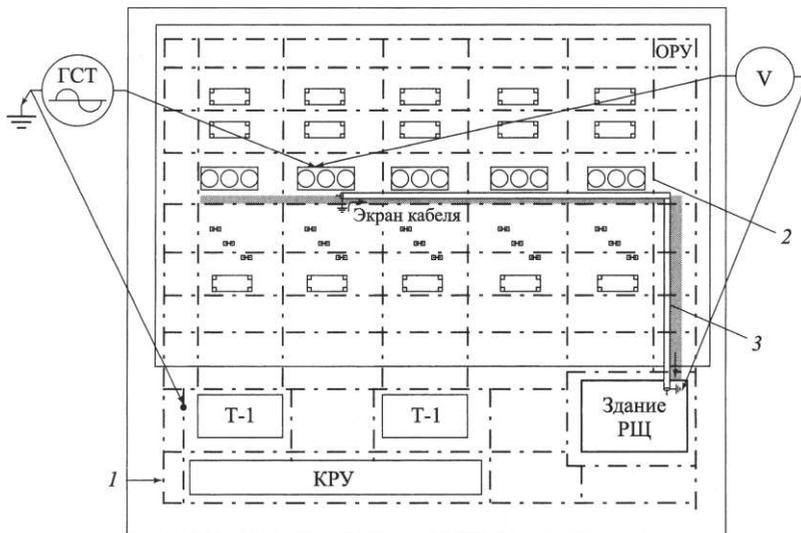
Для наиболее опасных выбранных мест имитируют КЗ на корпус оборудования и измеряют распределение потенциалов по заземляющему устройству: в точке КЗ, в местах установки устройств АСТУ и в местах возможного воздействия опасного напряжения на кабели (например, на заземляющих проводниках в кабельных каналах) (рис. 14.1).

Имитацию КЗ проводят при помощи генератора синусоидального тока (ГСТ) и комплекта реостатов (см. прил. 8). Сопротивление реостатов подбирают таким, чтобы распределение токов (в процентном соотношении), протекающих по элементам заземляющего устройства (оборудования, нейтралю Т, АТ), было идентичным с распределением токов при реальных КЗ.

Имитация КЗ может быть проведена без применения реостатов. В этом случае имитируют отдельно каждую составляющую тока КЗ: от каждого трансформатора (автотрансформатора) и от энергосистемы.

Если напряжение, воздействующее на изоляцию кабелей и устройств, превышает допустимое значение, имитацию КЗ проводят на каждом оборудовании, к которому подходят кабели цепей вторичной коммутации.

При имитации КЗ также измеряют токи от оборудования в заземлитель по заземляющему проводнику, трубопроводам, металлоконструкциям и кабелям (оболочке, броне, экрану). Измерения проводят с помощью селективных к частоте ГСТ токовых клещей. Измеряют ток от ГСТ и в процентах к нему токи, проходящие по естественным и искусственным частям ЗУ.



**Рис. 14.1. Схема проведения измерений на подстанции высокого напряжения при имитации КЗ на землю**

Значения токов и напряжений, полученные в результате имитационных измерений, пересчитывают к реальным значениям тока КЗ (см. прил. 8). Результаты измерений зависят от удельного сопротивления грунта и поэтому их пересчитывают для наиболее неблагоприятных климатических условий. Измерения дополняют расчетами по расчетной программе (см. прил. 9). Результаты измерений используют для тестирования расчетов.

Полученную схему ЗУ вводят в расчетную программу. В программе воспроизводят имитационные воздействия, выполненные на объекте, и производят сравнение расчетов с измерениями. При расхождении расчетных и экспериментальных значений более, чем на 15 %, проводят дополнительные измерения по уточнению параметров схемы ЗУ. После достижения совпадения результатов в пределах 15 % считают, что расчетная схема ЗУ соответствует реальной. Далее проводят расчеты распределения напряжений по ЗУ и токов в экранах, оболочке или броне кабелей для каждого из оборудования при удельном сопротивлении грунта, соответствующем наиболее неблагоприятным климатическим условиям.

Результаты измерений и расчетов оформляют в протоколе № 1 (см. прил. 5).

При необходимости снижения уровней воздействующих токов и напряжений промышленной частоты выбирают мероприятия, указанные в § 13.3.

### **14.2.2. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях на шинах распределительного устройства**

Возникновение импульсных помех в цепях вторичной коммутации связано со следующими воздействиями в первичных цепях: КЗ на землю на шинах РУ; коммутации разъединителями, короткозамыкателями и выключателями; срабатывания разрядников.

Исходными данными для проведения измерений и расчетов импульсных помех являются:

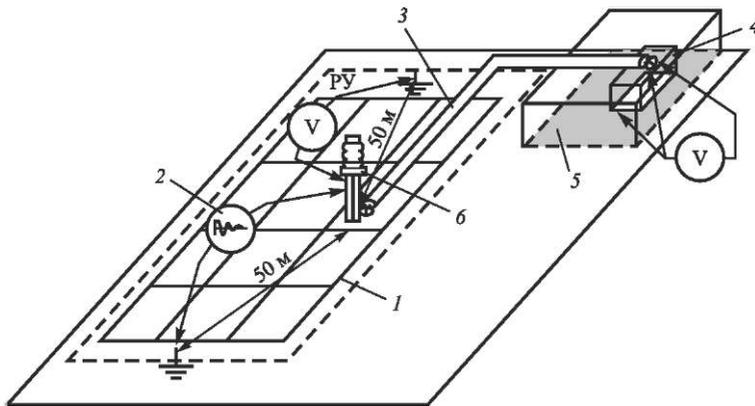
- электрическая оперативная схема;
- план расположения оборудования с трассами прокладки кабелей;
- состав и расположение аппаратуры АСТУ;
- электрические связи аппаратуры с силовым оборудованием (по кабельному журналу);
- удельное сопротивление грунта (геоэлектрический разрез);
- места заземления цепей напряжения и тока АСТУ;
- сечение и высоты подвеса шин ВН на ОРУ, конструкция фазы.

**Импульсные помехи, обусловленные увеличением потенциала заземлителя.**

При коммутациях (через паразитные емкости оборудования на землю) и коротких замыканиях на землю в ЗУ проходит импульсный ток высокой частоты. На оборудовании возникает скачок потенциала. Возросший потенциал с определенным коэффициентом ослабления передается по кабелям на вход устройств АСТУ.

Высокочастотную составляющую тока короткого замыкания имитируют при помощи генератора высокочастотных импульсов – ГВЧИ (см. прил. 6). Схема экспериментов приведена на рис. 14.2. Для измерений выбирают цепи, где ожидается наибольший уровень помех. Такими являются цепи, для которых входное сопротивление на устройствах в нормальном режиме больше 1 кОм, например, разомкнутый контакт.

Один выход генератора высокочастотных импульсов подключают к заземляющему проводнику оборудования на РУ, к которому подходят кабели от устройств АСТУ. Другой выход генератора заземляют на расстоянии не менее 50 м от данного оборудования.



**Рис. 14.2. Схема эксперимента по определению импульсных помех при протекании высокочастотной составляющей тока КЗ**

Необходимое расстояние между оборудованием и местом заземления второго выхода генератора определяют по табл. 14.1.

В заземляющий проводник оборудования подают от ГВЧИ колебательный затухающий импульс с амплитудой от 2 до 20 А и более, декрементом колебания 3–5 и различной частотой колебаний (не менее трех значений частоты колебаний). На реальных объектах частота колебаний импульсных помех может изменяться от десятков килогерц до десятков мегагерц. Измерения при трех различных частотах позволяют установить зависимость импульсного сопротивления ЗУ оборудования и уровня импульсных помех от частоты. При пересчете к реальному значению тока используют полученную зависимость для определения импульсного сопротивления на частоте, которая наиболее близка к основной частоте высокочастотной составляющей тока КЗ.

**Необходимое расстояние между оборудованием  
и местом заземления второго выхода генератора**

Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом · м	Необходимое расстояние до места заземления второго выхода генератора, м
Менее 1000	50
1000 – 2000	60
2000 – 5000	70
5000 – 10 000	80
10 000 – 15 000	90

На входах устройств АСТУ импульсным вольтметром или осциллографом измеряют фоновые значения помех при выключенном генераторе. При включенном генераторе при фиксированных амплитуде и частоте колебаний импульса тока проводят измерения импульсным вольтметром или осциллографом синфазных и противофазных помех на зажимах в месте подключения кабелей к устройствам АСТУ.

Одновременно с измерением помех в цепях вторичной коммутации проводят измерение потенциала на заземляющем проводнике оборудования и определяют импульсное сопротивление  $Z_{\text{имп.обор}}$  растеканию тока как отношение максимальных значений напряжения и выходного тока генератора. Потенциал на заземляющем оборудовании измеряют с помощью импульсного вольтметра относительно земли на расстоянии не менее 50 м (см. табл. 14.1) в противоположном направлении от места заземления генератора.

Допускается выбрать не менее двух образцов однотипного оборудования, например выключателей, и провести измерение импульсных помех в цепях вторичной коммутации только этого оборудования.

Затем рассчитывают коэффициент передачи

$$K_{\text{перед}} = U_{\text{зас.обор}} / U_{\text{пом.имит}} = I_{\text{имит}} Z_{\text{имп.обор}} / U_{\text{пом.имит}}$$

показывающий, как уменьшается амплитуда при прохождении импульса напряжения по кабелю от оборудования до устройств АСТУ. Здесь  $U_{\text{зас.обор}} = I_{\text{имит}} Z_{\text{имп.обор}}$  – потенциал на заземляющем проводнике оборудования;  $I_{\text{имит}}$  – ток от генератора при имитационных измерениях;  $U_{\text{пом.имит}}$  – напряжение помехи во вторичных цепях.

Если расстояния от наиболее удаленного и наиболее близкого образцов выбранной группы оборудования до места установки аппаратуры АСТУ различаются более чем в 1,5 раза,  $K_{\text{перед}}$  рассчитывают для наиболее близкого и наиболее удаленного образцов оборудования. В промежуточных случаях  $K_{\text{перед}}$  определяют линейной интерполяцией. Для РУ, где число ячеек превышает 10, выполняют измерения и на одном-двух промежуточных образцах оборудования.

Измерения проводят также для других групп оборудования и определяют  $K_{\text{перед}}$  для каждой группы оборудования. Для трансформаторов напряжения, вторичные цепи которых заземляют на РУ, измерения проводят для всех образцов оборудования.

Для каждого образца оборудования, к которому подходят кабели от устройств АСТУ, измеряют  $Z_{\text{имп.обор}}$ .

Результаты измерений помех во вторичных цепях пересчитывают к наибольшему возможному значению ВЧ-составляющей тока КЗ –  $I_{ВЧ}$ . Реальный ток КЗ определяют расчетом или для приближенной оценки используют данные из табл. 14.2.

Таблица 14.2

**Наибольшие значения высокочастотной составляющей тока КЗ**

Высокочастотная составляющая тока КЗ	Номинальное напряжение подстанции $U_{ном}$									
	110		220		330		500		750	
	Число частот шин, подходящих к месту КЗ									
	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
$I_{ВЧ}^*$	0,48	1,9	0,95	3,8	1,15	6,2	2,75	11,0	4,75	19,0
$I_{ВЧ}^{**}$	0,55	2,2	1,1	4,25	1,8	7,0	3,2	12,8	4,4	17,6
$I_{ВЧ}^{***}$	0,88	3,5	1,8	7,1	2,2	8,7	3,3	15,3	5,4	21,5

Примечание. Здесь  $I_{ВЧ}^*$  – амплитуда импульса тока в заземлителе при КЗ на РУ с подключенным ОПН (ограничитель перенапряжения нелинейный);  $I_{ВЧ}^{**}$  и  $I_{ВЧ}^{***}$  – то же при КЗ на РУ с РВ при минимальном и максимальном значениях, пробивного напряжения разрядника (разрядник вентильный).

Напряжение помехи при КЗ определяют по формуле

$$U_{пом.к} = I_{ВЧ} Z_{имп.обор} / K_{перед}$$

Полученное значение сравнивают с допустимым для устройств значением. Если не определен тип устройств, устанавливаемых на объекте, указывают степень жесткости испытаний на помехоустойчивость.

Результаты измерения импульсного сопротивления используют для определения возможности обратного перекрытия с заземления оборудования на вторичные цепи. Перекрытие наиболее вероятно на контактах клеммника, к которому присоединены вторичные цепи оборудования. Пробивное напряжение межконтактной изоляции типовых клеммников при импульсном воздействии на частотах выше 100 кГц составляет не менее 10 кВ.

Таким образом, необходимое условие отсутствия обратного перекрытия

$$U_{з.з.обор} < 10 \text{ кВ.}$$

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 2 (см. прил. 5).

**Импульсные излучаемые помехи.** При коммутациях первичного оборудования и при КЗ на шинах РУ протекают импульсные токи. Электромагнитные поля от этих токов создают импульсные помехи в цепях вторичной коммутации. Наибольший уровень излучаемых помех отмечают при КЗ на шинах РУ.

Для определения уровней излучаемых импульсных помех проводят имитацию высокочастотных процессов в первичных цепях. Для каждого РУ с использованием исходных данных определяют трассы прокладки кабелей от оборудования высокого напряжения до помещений, где установлены устройства АСТУ. Для всех кабельных трасс выбирают главные участки, по которым проходит основная часть кабелей. Конфигурация главного участка может быть прямолинейной или сложной, состоящей из двух отрезков (например, пересекающихся под прямым углом). Эти участки используют для имитации воздействия электромагнитного поля.

Если на РУ имеется несколько кабельных трасс (например, одна трасса в виде кабельного тоннеля и одна трасса в виде кабельного лотка), для измерений выбирают главные участки на каждой трассе.

Для проведения измерений из всех видов кабелей, проходящих по рассматриваемому участку трассы, выбирают по 1–2 образца каждой группы наиболее длинных кабелей: с экраном, без экрана, в оболочке. Кабели подбирают таким образом, чтобы в них имелись либо свободные жилы (с неповрежденной изоляцией), либо рабочие жилы, у которых нагрузка со стороны устройств имеет сопротивление более 1 кОм.

Вдоль кабельных трасс, по которым проложены выбранные для измерений кабели, прокладывают контрольные провода. Контрольные провода прокладывают по поверхности грунта рядом с каналом или лотком таким образом, чтобы длина провода была примерно равна длине кабеля.

Параллельно выбранному участку кабельной трассы (на расстоянии не менее 5 м от контрольного провода) на высоте 1–1,5 м подвешивают провод, моделирующий шины ВН. К этому проводу подключают генератор высокочастотных импульсов – (рис. 14.3).

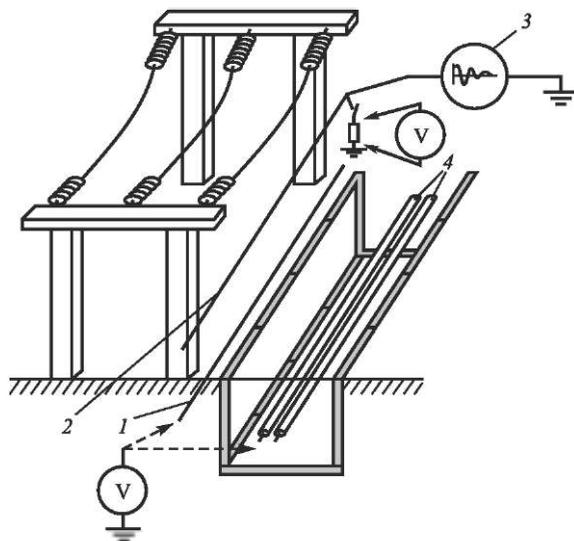


Рис. 14.3. Схема имитации излучаемых помех

На контрольном проводе и на выбранных кабелях при выключенном генераторе в месте установки устройств АСТУ измеряют фоновые значения напряжения помех импульсным вольтметром  $V$ . Включают генератор и при фиксированных амплитуде и частоте колебаний импульса тока проводят измерения наведенных помех на контрольном проводе ( $U_{\text{пров}}$ ) и на выбранных кабелях ( $U_{\text{цепи}}$ ) импульсным вольтметром или осциллографом. Имитационные испытания проводят на тех же частотах, что и при распространении импульсных помех по заземляющему устройству.

Отношение напряжения  $U_{\text{пров}}$  к  $U_{\text{цепи}}$  является общим коэффициентом экранирования  $K_{\text{экр}} = U_{\text{пров}} / U_{\text{цепи}}$ , который показывает, во сколько раз по сравнению с одиночным проводом излучаемая помеха ослабляется соседними жилами в кабеле, соседними кабелями в кабельном канале, металлоконструкциями кабельного канала, экранами и оболочками кабеля. Коэффициент экранирования, являющийся характеристикой данного объекта, затем используют в расчетах.

Измерения проводят на всех кабелях, проходящих по данному главному участку, после чего провод – источник помех размещают параллельно другому главному участку кабельной трассы и проводят измерения на кабелях, проходящих по этому главному участку.

На строящемся объекте в качестве источника излучаемой помехи могут быть использованы непосредственно шины высокого напряжения. Для этого собирают рабочую схему РУ, подают питание от постороннего источника переменного или постоянного напряжения (от 200 до 1000 В) на шины, осуществляют замыкание на ЗУ и измеряют импульсные помехи в цепях вторичной коммутации. Значения амплитуды импульсных помех при реальных КЗ пропорциональны отношениям реальных напряжений к напряжениям на шинах при имитационных экспериментах.

Проводят также измерение импульсных помех при коммутациях силового оборудования. Целью измерений является определение амплитуды и спектрального состава импульсных помех в цепях измерения, управления, сигнализации и питания аппаратуры АСТУ при коммутациях силового оборудования. Измерения проводят при операциях с силовыми выключателями, разъединителями, короткозамыкателями на РУ напряжением 6 кВ и выше.

Наибольшие помехи возникают при следующих коммутациях: включение/отключение шинных и линейных разъединителей на отключенный выключатель; включение/отключение силовым выключателем или обходным разъединителем обходной системы шин; включение/отключение выключателями участка ненагруженной линии, силовых автотрансформаторов, трансформаторов, шунтирующих реакторов; коммутации протяженных отрезков шин разъединителями и силовыми выключателями.

Регистрацию помех проводят в цепях измерения, управления, сигнализации и питания устройств АСТУ. Наибольший уровень помех следует ожидать в измерительных цепях, заземление которых выполнено на РУ, и в цепях, которые проложены по территории РУ в кабельных лотках или каналах.

Измерительную аппаратуру подключают по схеме общего вида (схема провод–земля, «землей» является корпус устройств АСТУ) и схеме дифференциального типа (схема провод–провод) на панелях и в шкафах, где установлены устройства АСТУ, и проводят следующие виды измерений: осциллографирование помех; регистрацию максимальной амплитуды и числа импульсов.

При измерениях используют осциллографы с полосой пропускания не менее 10 МГц для объектов с открытым РУ и не менее 50 МГц для подстанций с элегазовой изоляцией. Максимальное значение импульсных помех в отдельных случаях может достигать 10–15 кВ. Чтобы исключить повреждение измерительной аппаратуры, применяют специальные делители напряжения. Питание осциллографов осуществляют либо от независимого источника (например, встроенной аккумуляторной батареи), либо от общей сети через разделительный трансформатор при наличии устройств ограничения перенапряжений.

Последовательность действий при измерениях следующая:

- 1) измерительную аппаратуру подключают к измеряемым цепям;
- 2) после сигнала о готовности измерительной аппаратуры производят коммутацию;
- 3) результаты измерений сохраняют в компьютере или памяти осциллографа;
- 4) выполняют повторную коммутацию;
- 5) пункты 2–4 повторяют до выполнения всех коммутаций;
- 6) измерительную аппаратуру отключают от цепей; проверяют правильность соединения цепей.

Окончательный вывод об уровне помех делают на основании расчетов. Расчеты проводят при помощи расчетной программы (см. прил. 9).

В расчетной программе собирают схему замещения для одного РУ, состоящую из следующих элементов: *LC*-цепи (шины) и емкости первичного оборудования, а также *LC*-цепи (контрольные провода, моделирующие кабели цепей вторичной коммутации).

Схему замещения собирают для одной фазы, расположенной на наименьшем расстоянии от кабельной трассы. Если конфигурация такова, что выявить ближайшую фазу к кабельной трассе на всем протяжении затруднительно, составляют схемы для каждой из наиболее близких фаз и расчеты проводят для каждой схемы.

Собирают исходную схему замещения для нормального режима, а затем перед расчетом каждой коммутации или КЗ ее изменяют.

Емкостями замещают следующее оборудование: силовые трансформаторы, трансформаторы напряжения, выключатели, трансформаторы тока.

В схеме замещения для данного РУ моделируют только те кабельные трассы, которые проходят по территории данного РУ. Предусматривают размещение контрольных проводов по основным кабельным трассам, по которым они прокладывались при имитационных измерениях.

Для расчета помех при КЗ на исходной схеме замещения задают точку КЗ и запускают программу на счет. При расчете помех при коммутациях исходную нормальную схему модифицируют так, чтобы она являлась начальной схемой до коммутации, и запускают программу на счет. В результате расчета определяют амплитудно-частотные характеристики напряжения на контрольных проводах в месте установки устройств АСТУ. Результаты расчета сравнивают с результатами измерений. При расхождении результатов расчетов и измерений более чем на 20 % уточняют расчетную схему и исходные данные для расчета (например, удельное сопротивление грунта).

Достаточно провести расчеты для 4–5 точек КЗ на сборных шинах и в 1–2 точках в каждой ячейке РУ. Если электрическая схема не содержит сборных шин, то расчеты проводят для  $(1-2)n$  точек равномерно по всему РУ, где  $n$  – число силовых выключателей. Так, если на РУ три выключателя (схема мостик), то расчеты достаточно провести для 3–6 точек (в зависимости от площади РУ) с учетом рекомендаций, приведенных ранее.

Для нормальной оперативной схемы РУ проводят расчеты для следующих видов коммутаций: включение шинного или линейного разъединителей на отключенный силовой выключатель; подачи напряжения на обходную систему шин выключателем; включение силового трансформатора (автотрансформатора) или включения ненагруженной линии выключателем, вывода в ремонт рабочей системы шин.

После проведения расчетов для нормальной оперативной схемы РУ проводят расчеты излучаемых помех для других возможных конфигураций первичной схемы, связанных с выводом оборудования в ремонт. Моделируют ситуации (для каждого присоединения), при которых значительно меняется конфигурация исходной схемы, например, учитывают:

- выведенный в ремонт выключатель (особенно для схем с обходной системы шин);
- выведенное в ремонт присоединение (линия, трансформатор, автотрансформатор);
- выведенную в ремонт рабочую систему шин.

Для каждой схемы, отличной от нормальной оперативной, проводят расчеты помех при КЗ. Для каждой основной кабельной трассы из полученных результатов расчетов выбирают наибольшие значения (для коммутаций и КЗ).

Результаты расчетов для контрольных проводов приводят к реальным вторичным цепям. Для этого выбирают одну из цепей. Определяют трассу, по которой проложен

кабель с выбранной цепью, например, трассу № 1. Наибольшие значения излучаемых помех при КЗ или коммутациях определяют как:

$$U_{\text{пом.цепи}} = U_{\text{контр.каб.трасса № 1}} / K_{\text{экр.цепи.каб.трасса № 1}}$$

где  $U_{\text{пом.цепи}}$  – максимально излучаемое напряжение помехи в выбранной цепи управления выключателя при КЗ или коммутациях;  $U_{\text{контр.каб.трасса № 1}}$  – максимальное излучаемое напряжение помех на контрольном проводе, проложенном по трассе № 1;  $K_{\text{экр.цепи каб трасса № 1}}$  – коэффициент экранирования для выбранной цепи, проложенной по трассе № 1.

Допускается применять другие методы моделирования и расчета, если они обеспечивают такую же или более высокую точность.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 3 (см. прил. 5).

При необходимости снижения уровней воздействующих импульсных помех выбирают мероприятия, указанные в гл. 13.

### 14.2.3. Импульсные помехи при ударах молнии

При ударе молнии в объект в результате воздействия электромагнитного поля в контрольных кабелях наводятся импульсные помехи. Ток молнии, протекающий по ЗУ, создает высокий потенциал на земле и может вызвать обратные перекрытия изоляции контрольных кабелей.

Исходными данными для определения наводимых импульсных помех и потенциалов на ЗУ являются:

- план расположения оборудования и молниеотводов с трассами прокладки кабелей;
- состав установленной аппаратуры АСТУ;
- удельное сопротивление грунта;
- схема токоотводов и заземления молниеприемников.

**Импульсные излучаемые помехи.** Импульсные излучаемые помехи определяют путем использования расчетной программы (см. прил. 9).

Параметры тока молнии для расчета выбирают в соответствии с рекомендациями МЭК 61312-1. При расчетах распределения потенциала на ЗУ принимают максимальное значение импульса тока  $I_m = 100$  кА, длительность фронта импульса  $t_{\text{фр}} = 10$  мкс, длительность импульса  $t_{\text{н}} = 300$  мкс; при расчетах наведенных напряжений в кабелях принимают  $I_m = 25$  кА,  $t_{\text{фр}} = 0,25$  мкс,  $t_{\text{н}} = 100$  мкс.

Для открытых РУ определяют напряжения, наводимые в кабелях вторичной коммутации при ударах молнии в молниеотводы, расположенные вблизи трасс прокладки кабелей.

Для зданий и сооружений определяют напряжения, наводимые в кабелях при протекании тока молнии по токоотводам молниеприемника здания. При расчетах учитывают коэффициент экранирования электромагнитного поля молнии экранированными кабелями, проложенными в кабельных каналах или коробах.

**Импульсные помехи, связанные с увеличением потенциала заземлителя.** Для определения возможного обратного перекрытия изоляции кабелей вторичных цепей проводят измерения распределения потенциалов по земле при имитации удара молнии в молниеприемник с помощью генератора импульсных токов (см. прил. 7).

На РУ генератор импульсов тока подключают между заземлением молниеприемника и заземленным электродом на расстоянии не менее 50 м от молниеприемника.

Измеряют потенциалы на земле вблизи кабельных каналов и лотков относительно точки, удаленной на расстояние не менее 50 м в направлении, противоположном от точки заземления генератора.

При имитации удара молнии в здания и сооружения генератор импульсов тока подключают к молниеприемнику (стержень или сетка) наверху здания и к электроду в земле на расстоянии не менее 20 м от здания.

Осуществляют имитацию удара молнии в молниеприемник и измеряют потенциалы в здании относительно точки, удаленной от здания на расстояние не менее 20 м в направлении, противоположном от точки заземления генератора.

Измерения проводят при двух и более различных импульсах тока с временем фронта импульсов тока, отличающихся более чем в 3 раза в диапазоне от 0,25 до 10 мкс.

Полученные результаты измерений пересчитывают к току молнии по МЭК 61312-1. Коэффициент пересчета принимают пропорциональным отношению тока молнии к току от генератора при условии, что время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии не более, чем на 10 %.

Если время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии более, чем на 10 %, производят экстраполяцию результатов измерений при различных импульсах тока к нормируемым значениям времени фронта импульса.

Окончательный вывод об уровне импульсных помех делают на основании расчетов. Расчеты проводят при помощи расчетной программы (см. прил. 9).

Результаты расчета, проведенного для имитационных условий, сравнивают с результатами измерений. При расхождении результатов расчетов и измерений более, чем на 20 % уточняют расчетную схему и исходные данные для расчета (например, удельное сопротивление грунта).

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протоколов № 4 и № 5 (см. прил. 9).

При необходимости снижения уровней импульсных помех от тока молнии реализуют рекомендуемые в гл. 13 мероприятия.

#### **14.2.4. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона**

В местах установки устройств АСТУ проводят измерения напряженности полей радиочастотного диапазона от 1 до 1000 МГц в местах установки устройств АСТУ.

Измеряют в режиме мониторинга напряженность электромагнитного поля от внешних источников.

Измеряют напряженности электромагнитного поля от работающих переносных и стационарных радиопередающих станций, которые используются персоналом энергообъекта.

Измеряют зависимость напряженности поля от расстояния до источника электромагнитного излучения и ослабление напряженности поля искусственными преградами (стены, экраны, корпуса шкафов и т.д.).

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 7 (см. прил. 5).

При необходимости ослабления электромагнитных радиочастотных полей выбирают рекомендуемые в гл. 13 мероприятия.

### 14.2.5. Разряды статического электричества

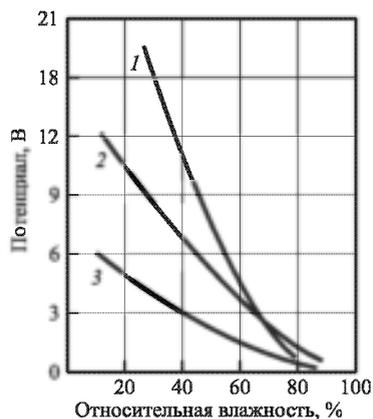
Наиболее часто встречающаяся форма возникновения электростатических зарядов – электризация трением. Электризация трением проявляется, как правило, вследствие контакта тела человека с его одеждой, стулом, полом, рабочими средствами и предметами, а также при соприкосновении деталей, панелей, приборов с другими устройствами. На действующих объектах энергетики для устройств АСТУ наиболее вероятными источниками статического электричества является персонал, обслуживающий эти устройства.

Оценку наибольшего электростатического потенциала тела человека проводят путем непосредственных измерений на энергообъекте или расчетом с использованием результатов измерений на образце напольного покрытия. При этом измеряют характеристики диэлектрического покрытия пола в помещении, где установлены устройства АСТУ и оценивают диапазон изменения влажности воздуха в помещении.

Измерения потенциала тела человека (оператора) проводят электростатическим вольтметром. Для расширения диапазона измерений используют емкостный делитель. Потенциал,  $U_{т.о}$ , кВ, тела оператора определяют из выражения

$$U_{т.о} = [(C_1 + C_2)/C_1]U_V$$

где  $C_1$  – суммарная емкость вольтметра, соединительного кабеля и оператора (верхнего плеча делителя), мкФ;  $C_2$  – емкость нижнего плеча делителя, мкФ;  $UV$  – показания вольтметра, кВ.



Измеренные значения потенциала пересчитывают для наиболее неблагоприятного режима, соответствующего нижнему значению влажности воздуха (рис. 14.4).

**Рис. 14.4. Зависимости потенциала зарядов статического электричества человека от относительной влажности воздуха:**

*A* – при движении по резиновому коврику на расстояние 6 м; *C* – при движении по виниловому полу на расстояние 6 м; *D* – при вставании со стула

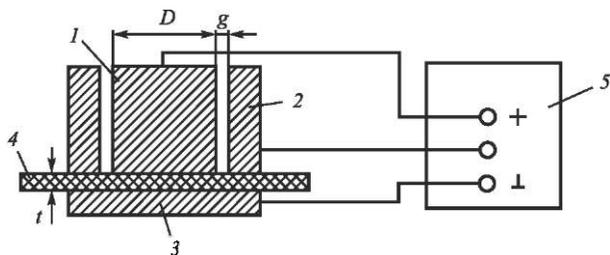
Расчетную оценку электростатического потенциала производят на основании результатов измерений поверхностного и объемного сопротивления  $RS$  и  $RV$  образца напольного покрытия. Для измерений используют тераомметр и стандартные электроды, схема подключения которых представлена на рис. 14.5.

Расчет удельного поверхностного и объемного сопротивления ( $\rho_S$ , Ом) и ( $\rho_V$ , Ом·м) проводят по следующим выражениям

$$\rho_S = \frac{\pi(D + g)R_S}{g};$$

$$\rho_V = \frac{\pi(D + g)^2 R_V}{4l},$$

где  $R_s$  – измеренное поверхностное сопротивление, Ом;  $R_v$  – измеренное объемное сопротивление, Ом;  $D$  – диаметр потенциального электрода, м;  $g$  – зазор между потенциальным и измерительным электродами, м;  $t$  – толщина напольного покрытия, м.



**Рис. 14.5. Схема измерений поверхностного и объемного сопротивления полимерного диэлектрика:**

1 – потенциальный электрод; 2 – измерительный электрод; 3 – охранный электрод; 4 – образец полимерного диэлектрика; 5 – тераомметр Е6-13

По результатам измерений поверхностного сопротивления напольного покрытия делают приближенную оценку возможного потенциала тела человека, перемещающегося по полу, при относительной влажности не менее 60%:

Удельное поверхностное сопротивление, Ом .....	$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$
Потенциал тела человека, кВ .....	2	4	6	8

По результатам измерений объемного сопротивления напольного покрытия делают приближенную оценку возможного потенциала тела человека, перемещающегося по полу, при относительной влажности не более:

Удельное объемное сопротивление, Ом · м .....	$1,5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$10^9$
Потенциал тела человека, кВ .....	2	4	6	8

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 6 (см. прил. 5).

При необходимости дополнительной защиты от статического электричества выбирают рекомендуемые в гл. 13 мероприятия.

### 14.2.6. Магнитные поля промышленной частоты

Непосредственные измерения напряженности магнитных полей частотой 50 Гц проводят в нормальных режимах при помощи измерителя магнитного поля в местах установки устройств АСТУ на РУ вдоль трассы прокладки кабелей.

Для режимов КЗ на шинах РУ уровень напряженности магнитных полей определяют расчетным путем. Рассматривают режим КЗ на шинах РУ вблизи места установки устройств АСТУ

Приближенные оценки проводят по формуле  $H = I_k / 2\pi r$ , где  $r$  – расстояние до шин, по которым проходит ток короткого замыкания  $I_k$ .

В тех случаях, когда вблизи места установки устройств АСТУ размещены реакторы или трансформаторы, измеряют напряженность магнитного поля в нормальном режиме и пересчитывают для условий протекания токов КЗ.

Приближенный расчет напряженности,  $H$ , А/м, поля, создаваемого вдоль оси реактора, выполняют по выражению

$$H = \frac{I_n}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1,5}},$$

где  $r$  – радиус реактора, м;  $x$  – расстояние по оси реактора от его центра до точки измерения, м;  $I$  – ток в реакторе, А;  $n$  – число витков.

Приближенный расчет напряженности,  $H$ , А/м, поля, создаваемого реактором в горизонтальной плоскости на расстояниях более двух диаметров реактора, выполняют по выражению

$$H = \frac{I_n}{4\pi} \left[ \int_0^{2\pi} \frac{rx \cos \beta}{(r^2 + x^2 - 2rx \cos \beta)^{1,5}} d\beta - \int_0^{2\pi} \frac{r^2}{(r^2 + x^2 - 2rx \cos \beta)^{1,5}} d\beta \right],$$

где  $\beta$  – угол между вектором, направленным из центра реактора в точку измерений, и осью абсцисс.

Для нескольких реакторов искомую напряженность магнитного поля определяют методом суперпозиции напряженности полей от каждого реактора с учетом фазового сдвига токов.

Напряженность магнитного поля, создаваемого транс-форматором, много меньше, чем напряженности поля, создаваемого реактором. Магнитное поле трансформатора, в основном, сосредоточено в магнитопроводе. Воздействие магнитного поля трансформатора на АСТУ может представлять опасность лишь в непосредственной близости от трансформатора. Расчет напряженности магнитного поля вблизи трансформатора представляет сложную задачу. В этом случае определяют напряженность магнитного поля экспериментально.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 8 (см. прил. 5).

При необходимости снижения уровней воздействующих магнитных полей промышленной частоты, выбирают мероприятия, указанные в гл. 13.

#### 14.2.7. Импульсные магнитные поля

Напряженность импульсных магнитных полей измеряют при имитации удара молнии в молниеприемник, расположенный вблизи от устройств АСТУ, и при коммутациях силового оборудования.

Расчетные оценки импульсных магнитных полей проводят для случаев протекания тока молнии по молниесостодам или токоотводам молниеприемников зданий и сооружений, расположенным вблизи места размещения устройств АСТУ. Приближенные оценки проводят по формуле  $H = I_M / 2\pi r$ ,  $r$  – расстояние, м, до молниеприемника или токоотвода, по которому проходит весь ток молнии  $I_M$ , А, или его часть.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протокола № 9 (см. прил. 5).

При необходимости снижения уровней воздействующих импульсных магнитных полей выбирают мероприятия, указанные в гл. 13.

#### 14.2.8. Помехи, связанные с возмущениями в цепях питания АСТУ постоянного и переменного тока

К основным периодическим помехам в цепях постоянного тока относятся переменные составляющие напряжения (пульсации) и кондуктивные помехи радиочастотного диапазона, а в цепях питания переменного тока – гармонические составляющие

напряжения. Импульсные помехи в цепях постоянного и переменного тока возникают при коммутации реле, электромагнитов, приводов силовых выключателей, автоматических выключателей.

Измерительную аппаратуру подключают к цепям питания по противофазной схеме (провод–провод) и, при необходимости, по синфазной схеме (провод–земля).

После подключения измерительной аппаратуры проводят следующие виды измерений: кратковременные измерения (осциллографирование формы сигнала помехи); длительную регистрацию (в том числе, при коммутациях силового оборудования).

Кратковременные измерения проводят в нормальных режимах (стационарные режимы работы силового оборудования): режим срабатывания реле; режим срабатывания автоматических выключателей в цепях питания; режим срабатывания электромагнитных приводов силовых выключателей.

Далее определяют характеристики пульсаций или коэффициент синусоидальности переменного напряжения и проводят измерения помех:

- возникающих при срабатывании реле, в том числе, принудительном, например, при опробовании силовых выключателей, проверке защит. При этом помехи измеряют в тех панелях (шкафах), где срабатывают реле;
- появляющихся при срабатывании автоматических выключателей в цепях питания при коммутациях в силовых сборках, на щите собственных нужд, щите постоянного тока. Помехи фиксируют в местах установки устройств АСТУ;
- в цепях оперативного тока при срабатывании электромагнитных приводов силовых выключателей в местах установки устройств АСТУ.

Длительную регистрацию проводят с целью определения диапазона характеристик помех в длительно существующих режимах. При данном типе измерений определяют амплитуду переменных и импульсных помех в цепях постоянного тока; гармонические составляющие и импульсные помехи в цепях переменного тока. Измерения проводят в тех же цепях, что и при кратковременной регистрации, при этом продолжительность непрерывных измерений составляет не менее одной недели. Затем анализируют аварийные режимы в сети питания и определяют возможные уровни пульсаций в сети постоянного тока и наибольшее время провалов напряжения.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде протоколов № 10–12 (см. прил. 5).

При необходимости снижения уровней электромагнитных помех в цепях питания АСТУ выбирают мероприятия, указанные в гл. 13.

### **14.2.9. Помехи от вспомогательного электрооборудования**

Источниками электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе АСТУ, является такое вспомогательное электрооборудование, как мощные преобразователи, сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструмент и др. При работе этого оборудования на АСТУ воздействуют полевые и кондуктивные помехи (импульсные и периодические помехи).

Непосредственные измерения напряженности магнитных полей при работе вспомогательного электрооборудования в местах установки устройств АСТУ проводят вдоль трассы прокладки кабелей при помощи измерителя напряженности магнитного поля.

Измерительную аппаратуру для регистрации импульсных и периодических помех подключают к цепям АСТУ по противофазной схеме (провод–провод) и, при необходимости, по синфазной схеме (провод–земля).

После подключения измерительной аппаратуры проводят следующие виды измерений: кратковременные измерения (осциллографирование формы сигнала помехи); длительную регистрацию (в том числе при коммутациях вспомогательного электрооборудования).

Длительную регистрацию проводят с целью определения диапазона характеристик помех в длительно существующих режимах. При данном типе измерений определяют амплитуду переменных и импульсных помех в цепях АСТУ. Измерения проводят в тех же цепях, что и при кратковременной регистрации, при этом продолжительность непрерывных измерений составляет не менее одной недели.

Результаты измерений и расчетов заносят в протоколы № 1–3 и 7–12 (см. прил. 5), указав источник электромагнитного воздействия.

#### **14.2.10. Оформление результатов измерений и расчетов**

По результатам измерений и расчетов составляют технический отчет по определению электромагнитной обстановки на энергообъекте, который утверждает руководитель предприятия.

Технический отчет включает:

- характеристику объекта и исходные данные для проведения работ по определению электромагнитной обстановки;
- результаты измерений и расчетов в виде протоколов;
- анализ результатов измерений и расчетов;
- заключение о электромагнитной обстановке и электромагнитной совместимости АСТУ;
- рекомендации по степени жесткости испытаний устройств АСТУ и мероприятиям для улучшения ЭМО в случае необходимости.

В протоколах № 2–4 и 6–12 (см. прил. 5) в графе «Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия)» указывают степень жесткости испытаний устройства на помехоустойчивость (для вновь проектируемых устройств) или допустимое значение данного воздействия (для выбранных или установленных устройств).

Степень жесткости испытаний определяют по условию: испытательный нормируемый уровень воздействия должен быть больше или равен 1,2 наибольшего измеренного или расчетного уровней воздействия. Допустимый уровень воздействия должен быть не более 0,8 испытательного нормированного уровня воздействия соответственно степени жесткости испытаний установленной (выбранной) аппаратуры.

В протоколе № 1 в графе «Допустимый уровень действия» указывают испытательное напряжение изоляции кабелей и устройств, а также наибольший допустимый ток по термической стойкости в броне, оболочке или экране кабеля.

В протоколе № 5 в графе «Допустимый уровень воздействия» указывают наименьшее значение импульсного пробивного напряжения промежутка между заземлителем и кабельным каналом.

В графе «Выводы» указывают, соответствует или не соответствует ЭМО помехоустойчивости данного устройства. В заключение указывают, обеспечена ли электромагнитная совместимость устройств по данному воздействию.

### **14.3. Меры безопасности при определении электромагнитной обстановки**

Работы по измерениям характеристик ЭМО выполняют в соответствии с действующими Межотраслевыми правилами по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.

Работы по измерениям на действующих энергообъектах выполняют по нарядам в соответствии с Рабочей программой (см. прил. 3).

При имитации электромагнитных возмущений и измерениях на действующих РУ с использованием вынесенных токовых и потенциальных электродов принимают меры по защите от воздействия полного напряжения на заземлителе при стекании с него тока однофазного КЗ на землю.

При подготовке измерительных схем сначала присоединяют провод к вспомогательному электроду (токовому, потенциальному), а затем к соответствующему измерительному прибору.

### **14.4. Периодичность проведения работ по определению электромагнитной обстановки**

Определение ЭМО проводят на вновь строящихся объектах при пуско-наладочных работах.

При техперевооружении действующих объектов определение ЭМО проводят на этапе предпроектных изысканий и при пусконаладочных работах.

При эксплуатации энергообъекта проверку ЭМО проводят не реже 1 раза в 12 лет, а также внепланово при неправильной работе или повреждении устройств АСТУ из-за воздействия электромагнитных помех.

#### ***Вопросы для самопроверки***

1. Содержание методики определения напряжений и токов при КЗ на шинах распределительного устройства.
2. В чем состоит имитация импульсных помех?
3. Опишите схему экспериментов по определению импульсных помех при протекании высокочастотной составляющей тока КЗ.
4. Каким образом осуществляется имитация излучаемых импульсных помех?
5. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования.
6. Импульсные помехи при ударах молнии.
7. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона.
8. Разряды статического электричества.
9. Магнитные поля промышленной частоты.
10. Импульсные магнитные поля.
11. Помехи, связанные с возмущениями в цепях питания АСТУ постоянного и переменного тока.
12. Помехи от вспомогательного электрооборудования.

## Приложение 1

### БАЗОВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ЭМС В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Таблица П1.1

Базовые публикации, относящиеся к общим вопросам

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание
МЭК Руководство 107	Нормативный документ	Руководство по составлению публикаций в области ЭМС	DS DS/IEC GUIDE 107-2011
МЭК 60050(161)	Стандарт	Международный электротехнический словарь. Глава 161. Электромагнитная совместимость	ГОСТ Р 50397-2011 Термин и определения в области ЭМС
МЭК 61000-1-1	Технический доклад	Применение и интерпретация фундаментальных определений и терминов в области ЭМС	—
2007МЭК 61000-1-2	Стандарт	ЭМС и функциональная безопасность	ГОСТ Р 52317.1.2-2007

## Базовые публикации, относящиеся к условиям эксплуатации ТС

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание
<b>Общие положения</b>			
МЭК 61000-2-5	Стандарт	Классификация электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации	ГОСТ Р 51317. 2.5–2000
МЭК 61000-6-1:2005	Стандарт	Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением	ГОСТ 30804.6.1–2013
МЭК 61000-6-2	Стандарт	Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах	ГОСТ 30804.6.2–2013
МЭК 61000-6-3	Стандарт	Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением	ГОСТ 30804.6.3–2013
МЭК 61000-6-4	Стандарт	Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в промышленных зонах	ГОСТ Р 51317.6.4–99
МЭК 61000-6-5	Стандарт	Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях	ГОСТ Р 51317.6.5
ГОСТ 32137–2013	Стандарт	Стандарт применяется для конструктивно завершенных технических средств, поставляемых на ядерно- и радиационно опасные объекты народнохозяйственного назначения, в том числе, атомные станции	–
<b>Низкочастотные кондуктивные помехи</b>			
МЭК 61000-2-1	Технический доклад	Описание электромагнитной обстановки в общественных низковольтных системах электроснабжения	–

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание
МЭК 61000-2-2	Стандарт	Уровни совместимости для общественных низковольтных систем электроснабжения	–
МЭК 61000-2-4	Стандарт	Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий	ГОСТ Р 51317.2.4–2000
МЭК 61000-2-6	Технический доклад	Оценка уровней эмиссии на промышленных предприятиях	–
МЭК 61000-2-8	Проект технического доклада	Провалы и кратковременные прерывания напряжения электропитания	Рабочий документ МЭК 77/A375/CDV
МЭК 60725	Стандарт	Справочные полные сопротивления низковольтных сетей электроснабжения	–
<b>Низкочастотные излучаемые помехи</b>			
МЭК 61000-2-7	Технический доклад	Низкочастотные магнитные поля	–
<b>Высокочастотные кондуктивные и излучаемые помехи</b>			
МЭК 61000-2-3	Технический доклад	Описание помех. Излучаемые помехи. Кондуктивные помехи, не связанные с частотой сети	–
<b>Высотный электромагнитный импульс</b>			
МЭК 61000-2-9	Стандарт	Описание помехи излучения от высотного электромагнитного импульса	–
МЭК 61000-2-10	Стандарт	Описание кондуктивной помехи от высотного электромагнитного импульса	–
МЭК 61000-2-11	Стандарт	Классификация электромагнитной обстановки, возникающей в результате действия высотного электромагнитного импульса	–

## Базовые публикации по методам измерения в области ЭМС

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание
<b>Низкочастотные кондуктивные помехи</b>			
МЭК 61000-4-7	Стандарт	Общее руководство по методам измерения гармоник и интергармоник. Приборы для измерения параметров гармоник и интергармоник в системах электроснабжения и от оборудования, подключенного к ним	ГОСТ 30804.4.7-2013
МЭК 61000-4-15	Стандарт	Фликерметр. Технические требования и методы испытаний	ГОСТ Р 51317.4.15-99
<b>Низкочастотные кондуктивные и излучаемые помехи</b>			
СИСПР 16-1	Стандарт	Аппаратура для измерения параметров радиопомех и помехоустойчивости оборудования	Информация добавляется по мере необходимости
СИСПР 16-2	Стандарт	Методы измерения помехи и помехоустойчивости оборудования	Информация добавляется по мере необходимости

## Базовые публикации по методам испытаний на помехоустойчивость

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание (аналог и др.)
<b>Общее</b>			
МЭК 61000-4-1	Стандарт	Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний	ГОСТ Р 51317. 4.1-2000
<b>Порт корпуса</b>			
МЭК 61000-4-2	Стандарт	Устойчивость к электростатическим разрядам	ГОСТ 30804.4.2-2013
МЭК 61000-4-3	Стандарт	Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю	ГОСТ 30804.4.3-2013
МЭК 1000-4-8	Стандарт	Устойчивость к магнитным полям промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94
МЭК 1000-4-9	Стандарт	Устойчивость к импульсным магнитным полям	ГОСТ Р 50649-94
МЭК 1000-4-10	Стандарт	Устойчивость к загухающим колебательным магнитным полям	ГОСТ Р 50652-94

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание (аналог и др.)
<b>Сигнальные порты</b>			
МЭК 61000-4-4	Стандарт	Устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ 30804.4.4–2013
МЭК 61000-4-5	Стандарт	Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5–99
МЭК 61000-4-6	Стандарт	Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями	ГОСТ Р 51317.4.6–99
МЭК 61000-4-12	Стандарт	Устойчивость к колебательным затухающим помехам	ГОСТ Р 51317.4.12–99
МЭК 61000-4-16	Стандарт	Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц	ГОСТ Р 51317.4.16–2000
<b>Питание постоянным током</b>			
ГОСТ ИЕС 61000-4-29–2016		Испытания на устойчивость к провалам напряжения, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения на входном порте электропитания постоянного тока	–
МЭК 61000-4-17		Устойчивость к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока	ГОСТ Р 51317.4.17–2000
<b>Питание переменным током</b>			
МЭК 61000-4-11		Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания	ГОСТ 30804.4.11–2013
МЭК 61000-4-13	Стандарт	Устойчивость к искажениям синусоидальности напряжения электропитания, включая передачу сигналов по электрическим сетям	ГОСТ 30804.4.13–2013
МЭК 61000-4-14	Стандарт	Устойчивость к колебаниям напряжения электропитания переменного тока	ГОСТ Р 51317.4.14–2000
МЭК 61000-4-28	Стандарт	Устойчивость к изменениям частоты электропитания	ГОСТ Р 51317.4.28–2000

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа	Примечание (аналог и др.)
МЭК 61000-4-27	Стандарт	Устойчивость к небалансу трехфазного напряжения электропитания	–
<b>Высотный электромагнитный импульс</b>			
МЭК 61000-4-23	Стандарт	Методы испытаний устройств защиты от излучения высотного электромагнитного импульса и других помех	–
МЭК 61000-4-24	Стандарт	Методы испытаний устройств защиты от кондуктивных помех высотного электромагнитного импульса	–
МЭК 61000-4-25	Стандарт	Устойчивость оборудования и систем к воздействию высотного электромагнитного импульса	–

Таблица П.5

**Базовые публикации по установке оборудования  
в условиях эксплуатации и подавления помех**

Обозначение	Статус публикации	Тематика документа
<b>Установка оборудования</b>		
МЭК 61000-5-1	Технический доклад	Общие положения по установке оборудования и подавлению помех
МЭК 61000-5-2	Технический доклад	Заземление и кабельные соединения
МЭК 61000-5-6	Технический доклад	Уменьшение влияния внешних электромагнитных помех
МЭК 61000-5-7	Стандарт	Степени защиты, обеспечиваемые корпусами от влияния электромагнитных помех
<b>Высотный электромагнитный импульс</b>		
МЭК 61000-5-3	Технический доклад	Общие представления по защите от влияния высотного электромагнитного импульса
МЭК 61000-5-4	Технический доклад	Характеристики защитных устройств от излучаемых помех высотного электромагнитного импульса
МЭК 61000-5-5	Стандарт	Характеристики защитных устройств от кондуктивных помех высотного электромагнитного импульса

---

---

## РОССИЙСКИЕ СТАНДАРТЫ ПО ЭМС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

---

---

1. ГОСТ Р 51317.2.4–2000 (МЭК 61000-2-4–94). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий.

*Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий переменного тока частотой 50 Гц низкого (до 1000 В) и среднего (до 35 кВ) напряжения, а также в иных системах электроснабжения, не относящихся к системам общего назначения.*

2. ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000-2-5–95). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств.

*Три основные категории электромагнитных помех: низкочастотные, высокочастотные, электростатические разряды; уровни электромагнитной совместимости для различных классов мест размещения технических средств.*

3. ГОСТ Р 51317.3.2–99 (МЭК 61000-3-2–95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.

4. ГОСТ 30804.3.2–2013 (МЭК 61000-3-3–2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия, аппараты, приборы, устройства и оборудование с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к низковольтным распределительным электрическим сетям; измерение гармонических составляющих тока.*

5. ГОСТ 30804.3.3–2013 (МЭК 61000-3-3–2013). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура с потребляемым током не более 16 А в одной фазе, подключаемые к низковольтным*

*распределительным электрическим сетям частотой 50 Гц номинальным напряжением фаза-нейтраль от 220 до 240 В; нормы изменений напряжения при испытаниях.*

6. ГОСТ Р 51317.3.8–99 (МЭК 61000-3-8–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Передача сигналов по низковольтным электрическим сетям. Уровни сигналов, полосы частот и нормы электромагнитных помех.

*Электрическое оборудование, предназначенное для передачи сигналов по низковольтным электрическим сетям общего назначения и электрическим сетям потребителей эл. энергии в полосе частот от 3 до 525 кГц; нормы создаваемых оборудованием кондуктивных и излучаемых электромагнитных помех.*

7. ГОСТ 30804.3.11–2013 (МЭК 61000-3-11–2000). Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения при определенных условиях. Нормы и методы испытаний.

*Нормы изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера, которые могут быть вызваны оборудованием при испытаниях в регламентированных условиях.*

8. ГОСТ 30804.3.12–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний.

9. ГОСТ Р 51317. 4.1–2000 (МЭК 61000-4-1–2000). Взамен ГОСТ 29280–91. Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний.

*Требования к электротехническим, электронным и радиоэлектронным изделиям, оборудованию и системам по устойчивости к электромагнитным помехам и соответствующим видам испытаний.*

10. ГОСТ 30804.4.2–2013 (МЭК 61000-4-2–2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие правила оценки их помехоустойчивости при воздействии электростатических разрядов.*

11. ГОСТ Р 51317.4.3–99 (МЭК 61000-4-3–95) Взамен ГОСТ 30375-95/ГОСТ Р 50008–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний.

12. ГОСТ 30804.4.3–2013 (МЭК 61000-4-3–2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие методы оценки качества функционирования ТС при воздействии на них радиочастотных электромагнитных полей.*

13. ГОСТ 30804.4.4–2013 (МЭК 61000-4-4–2004). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие методы оценки качества функционирования ТС при воздействии на них*

наносекундных импульсных помех, возникающих в результате коммутационных процессов.

14. ГОСТ Р 51317.4.5–99 (МЭК 61000-4-5–95). Взамен ГОСТ 30374–95/ГОСТ Р 50007–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие методы оценки качества функционирования ТС при воздействии на них микросекундных импульсных помех большой энергии, вызываемых перенапряжениями, возникающими в результате коммутационных переходных процессов и молниевых разрядов.*

15. ГОСТ Р 51317.4.6–99 (МЭК 61000-4-6–96). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие методы испытаний для оценки воздействия на ТС кондуктивных электромагнитных помех, вызываемых излучениями преимущественно радиопередающих устройств в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц.*

16. ГОСТ 30804.4.7–2013 (МЭК 61000-4-7–2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

*Средства измерений, предназначенные для измерений спектральных составляющих напряжения и тока в полосе частот до 9 кГц, которые наложены на основные составляющие в системах электроснабжения частотой 50 и 60 Гц. Испытания отдельных образцов технических средств на соответствие нормам эмиссии низкочастотных кондуктивных помех.*

17. ГОСТ 30804.4.11–2013 (МЭК 61000-4-11–2007). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний. (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, подключаемые к низковольтным эл. сетям переменного тока, общие правила оценки помехоустойчивости ТС при динамических и постепенных изменениях напряжения электропитания.*

18. ГОСТ Р 51317.4.12–99 (МЭК 61000-4-12–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, общие требования к оценке качества функционирования при воздействии колебательных затухающих помех.*

19. ГОСТ 30804.4.13–2013 (МЭК 61000-4-13–2002). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к искажениям синусоидальности напряжения электропитания, включая передачу сигналов по электрическим сетям. Требования и методы испытаний (взамен отмененных национальных) на 29.01.2016.

20. ГОСТ Р 51317. 4.14–2000 (МЭК 61000-4-14–99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебаниям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, их устойчивость к колебаниям напряжения электропитания, характеризующимся малым размахом изменения напряжения.*

21. ГОСТ Р 51317.4.15–2012 (МЭК 61000-4-15–2010). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования.

*Приборы для измерения количественных характеристик фликера в низковольтных эл.сетях напряжением 230 В, частотой 50 Гц.*

22. ГОСТ Р 51317.4.16–2000 (МЭК 61000-4-16–98). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, их устойчивость к кондуктивным электромагнитным помехам, представляющим собой общие несимметричные напряжения.*

23. ГОСТ Р 51317.4.17–2000 (МЭК 61000-4-17–99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока. Требования и методы испытаний

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, их устойчивость к пульсациям напряжения.*

24. ГОСТ Р 51317.4.28–2000 (МЭК 61000-4-28–99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к изменениям частоты питающего напряжения. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование, их устойчивость к изменениям частоты питающего напряжения.*

25. ГОСТ Р 50648–94 (МЭК 1000-4-8–93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитным полям промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний.

*Технические требования к вновь разрабатываемым, изготавливаемым, модернизируемым и импортируемым ТС в части степеней жесткости испытаний на устойчивость к МППЧ и критериев качества функционирования при испытаниях, а также соответствующие методы испытаний.*

26. ГОСТ Р 50649–94 (МЭК 1000-4-9–93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсным магнитным полям. Технические требования и методы испытаний.

*Технические требования к вновь разрабатываемым, изготавливаемым, модернизируемым и импортируемым ТС в части степеней жесткости испытаний на устойчивость к ИМП и критериев качества функционирования при испытаниях, а также соответствующие методы испытаний.*

27. ГОСТ Р 50652–94 (МЭК 1000-4-10–93) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к затухающим колебательным магнитным полям. Технические требования и методы испытаний.

*Технические требования к вновь разрабатываемым, изготавливаемым, модернизируемым и импортируемым ТС в части степеней жесткости испытаний на устойчивость к воздействию ЗКМП и критериев качества функционирования при испытаниях, а также соответствующие методы испытаний.*

28. ГОСТ 30804.4.30–2013 (МЭК 61000-4-30–2008). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

*Методы измерений показателей качества электрической энергии (КЭ) в электрических сетях систем электроснабжения переменного тока частотой 50/60 Гц и порядок оценки результатов измерений.*

29. ГОСТ Р 51317.6.1–99 (МЭК 61000-6-1–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний.

30. ГОСТ 30804.6.1–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура, подключаемые к низковольтным (до 1000 В) распределительным электрическим сетям или получающие питание от специальных источников постоянного тока, подключаемых к низковольтным распределительным электрическим сетям, а также получающие питание от батарей или от низковольтных электрических сетей, не являющихся распределительными.*

31. ГОСТ 30804.6.2–2013 (МЭК 61000-6-2–2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура, подключаемые к электрическим сетям, получающим питание от силовых трансформаторов высокого или среднего напряжения.*

32. ГОСТ 30804.6.3–2013 (МЭК 61000-6-3–2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Нормы и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура, их устойчивость к электромагнитным помехам в полосе частот от 0 до 1000 МГц в указанной области применения.*

33. ГОСТ 30804.6.4–2013 (МЭК 61000-6-4–2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний.

*Электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура, их устойчивость к электромагнитным помехам в полосе частот от 0 до 1000 МГц в указанной области применения.*

34. ГОСТ Р 51317.6.5 (МЭК 61000-6-5–2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.

35. ГОСТ Р 51318.11–99 (СИСПР 11–97) Взамен ГОСТ 23450–79. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от промышленных, научных, медицинских и бытовых (ПНМБ) высокочастотных устройств. Нормы и методы испытаний.

*Нормы ИРП в полосе частот от 9 кГц до 12,5 ГГц.*

36. ГОСТ Р 51318.14.1–99 (СИСПР 14-1–93). Взамен ГОСТ 23511–79 и ГОСТ 30320–95/ГОСТ Р 50033–92. Совместимость технических средств электромагнитная.

Радиопомехи промышленные от бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Нормы и методы испытаний.

*Нормы ИРП в полосе частот от 150 кГц до 300 МГц от указанного оборудования.*

37. ГОСТ Р 51318.14.2–99 (СИСПР 14-2–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость бытовых приборов, электрических инструментов и аналогичных устройств. Требования и методы испытаний.

*Требования устойчивости к кондуктивным и излучаемым электромагнитным помехам непрерывного и импульсного характера, а также электростатическим разрядам.*

38. ГОСТ Р 51318.15–99 (СИСПР 15–96). Взамен ГОСТ 21177–82. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогичного оборудования. Нормы и методы испытаний.

*Нормы промышленных радиопомех в полосе частот 0,009–30 МГц от указанного оборудования.*

39. ГОСТ Р 51318.22–99 (СИСПР 22–97). Взамен ГОСТ 29216–91. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний

*Нормы промышленных радиопомех в полосе частот от 0,15 до 1000 МГц от указанного оборудования классов А и Б.*

40. ГОСТ Р 51318.24–99 (СИСПР 24–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость оборудования информационных технологий к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний.

*Требования устойчивости к кондуктивным и излучаемым электромагнитным помехам непрерывного и импульсного характера, а также электростатическим разрядам, в полосе частот от 0 до 1000 МГц.*

41. ГОСТ Р 51516–99 (МЭК 60255-22-4–92). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость измерительных реле и устройств защиты к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний.

*Степени жесткости испытаний, условия проведения испытаний, методы испытаний, критерии оценки.*

42. ГОСТ Р 51522–99 (МЭК 61326-1–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения. Требования и методы испытаний.

*Оборудование, получающее питание от электрических сетей напряжением не более 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока, а также от электрических цепей, в которых проводятся измерения.*

43. ГОСТ Р 51524–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний.

*Системы, подключаемые к электрическим сетям переменного тока с номинальным напряжением до 1000 В.*

44. ГОСТ Р 51525–99 (МЭК 60255-22-2–96). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость измерительных реле и устройств защиты к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.

*Степени жесткости испытаний, условия проведения испытаний, методы испытаний, критерии оценки.*

45. ГОСТ Р 51526–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для дуговой сварки. Требования и методы испытаний  
*Требования по ограничению электромагнитных помех, создаваемых оборудованием, предназначенным для использования в промышленных и бытовых условиях.*
46. ГОСТ Р 51527–99 (МЭК 60478-3–89). Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники питания постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний.  
*Устройства с потребляемым током не более 25 А, нормы радиопомех в полосе частот от 10 кГц до 30 МГц.*
47. ГОСТ Р 51699–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств охранной сигнализации. Требования и методы испытаний.  
*Стационарные, передвижные и портативные электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и аппаратура, входящие в состав систем охранной сигнализации, предназначенные для применения в жилых, коммерческих зонах, производственных зонах с малым энергопотреблением и в промышленных зонах, в помещениях и вне их.*
48. ГОСТ Р 51857–2001. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование пейджинговых систем связи, применяемых в ограниченных зонах. Требования и методы испытаний.  
*Портативные приемники, передатчики и приемопередатчики, стационарные приемники и передатчики, работающие в полосе частот от 3 кГц до 470 МГц, допустимые значения промышленных радиопомех, уровни побочных, внеполосных радиоизлучений и допустимые отклонения частоты передатчиков, требования помехоустойчивости.*
49. ГОСТ 22012–82. Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерений.
50. ГОСТ 22261–82. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
51. ГОСТ 28934–91. Совместимость технических средств электромагнитная. Содержание раздела технического задания в части электромагнитной совместимости.
52. ГОСТ Р 50010–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля.
53. ГОСТ Р 50012–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Методы измерения параметров низкочастотного периодического магнитного поля.
54. ГОСТ Р 50034–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Двигатели асинхронные напряжением до 1000 В. Нормы и методы испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам.
55. ГОСТ Р 50799–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость технических средств радиосвязи к электростатическим разрядам, импульсным помехам и динамическим изменениям напряжения сети электропитания. Требования и методы испытаний.
56. ГОСТ Р 50932–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний.

57. ГОСТ Р 50009–2000. Взамен ГОСТ Р 50009–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства охранной сигнализации. Требования и методы испытаний.

*Стационарные, подвижные и портативные технические средства, предназначенные для применения в помещениях и вне их.*

58. ГОСТ Р 50628–2000. Взамен ГОСТ Р 50628–93. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость машин электронных вычислительных персональных к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний.

*ПЭВМ, подключаемые к низковольтным эл. сетям переменного тока частотой 50 Гц, в том числе периферийные устройства, применяемые в составе ПЭВМ, а также оборудование различного назначения на основе ПЭВМ.*

59. ГОСТ Р 50745–99. Взамен ГОСТ Р 50745–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы бесперебойного питания. Устройства подавления сетевых импульсных помех. Требования и методы испытаний.

*Отдельные устройства и системы бесперебойного питания, предназначенные для подключения к низковольтным распределительным и промышленным электрическим сетям, а также устройства подавления сетевых импульсных помех.*

60. ГОСТ Р 50839–2000. Взамен ГОСТ Р 50839–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость средств вычислительной техники и информатики к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний.

*Устройства, подключаемые к низковольтным электрическим сетям переменного тока частотой 50 Гц.*

61. ГОСТ Р 51317.2.4–2000 (МЭК 61000-2-4-94). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий.

*Системы электроснабжения переменного тока частотой 50 Гц низкого (до 1000 В) и среднего (до 35 кВ) напряжения; помехи в сети электропитания, классы электромагнитной обстановки.*

62. СТО 56947007-29.240.043–2010. «Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов».

63. СТО 56947007-29.240.044–2010. «Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на электросетевых объектах».

64. СТО 56947007-29.130.15.114–2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 6–750 кВ.

65. СО 153-34.21.122–2004. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.

66. СТО 56947007-29.130.15.105–2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок.

67. СО 34.35.311.2004. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях.

**ГИГИЕНИЧЕСКИЕ НОРМЫ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Таблица П.3.1

Гигиенические нормы напряженностей полей

Страна, организация	Воздействие	Предельно допустимые уровни напряженностей	
		электрических полей, кВ/м	магнитных полей, кА/м
РФ	Производственные: при непрерывном воздействии	$E = 50/(T + 2)$ , где $T$ – время пребывания, ч	0,8
	при прерывистом воздействии	$E = 25$	6,4
РФ	На население, в том числе:	0,5–20	
	внутри зданий	0,5	
	в зоне жилой застройки	1,0	
	в населенной местности вне жилой застройки	5,0	
	на пересечении с автодорогой I–IV класса	10,0	
	в ненаселенной местности	15,0	
	в труднодоступной местности	20,0	
INIRC/IRPA	Производственное в течение рабочего дня	10,0	0,400
	Кратковременное	30,0	4,0
	На конечности человека	–	20,0
	Круглосуточное на население	5,0	0,080
	До нескольких часов в сутки	10,0	0,800
CENELEC	Производственное	20,7	3,976
	Внепроизводственное	7,0	0,320

Страна, организация	Воздействие	Предельно допустимые уровни напряженностей	
		электрических полей, кВ/м	магнитных полей, кА/м
ФРГ	Производственное	20,0	4,0
	На население	30,0	6,0
Великобритания, NRPB	Производственное	30,0	1,5
	Круглосуточное на население	2,6	0,138
	Случайное на население	12,0	0,600
Чехия	Производственное	15	–
	На пересечение с дорогами I–II классов	10	
	На население при постоянном пребывании	1	
Болгария	Производственное	5	–
		5–10 ( $T \leq 180$ мин)	
		10–15 ( $T \leq 90$ мин)	
		15–20 ( $T \leq 10$ мин)	
		20–25 ( $T \leq 5$ мин)	
25			
Польша	Производственное	15	–
	На население:		
	при постоянном пребывании	10 кВ/м	
при временном пребывании	1–10		
США, ACGIH	Производственное	25	0,8 А/м
Отдельные штаты: Флорида	Под ВЛ 500 кВ	10	–
	ВЛ 230 кВ	8	–
	На границе полосы отчуждения	2	–
Миннесота, Северная Дакота	Внутри полосы отчуждения	8	–
	Орегон	Внутри полосы отчуждения	9
Монтана	Пересечение ВЛ с дорогами	7	–
	На границе полосы отчуждения	1	–
Нью-Джерси	На границе полосы отчуждения	3	–
Нью-Йорк	Внутри полосы отчуждения	11,8	–
	Частные дороги	11	–
	Общественные дороги	7	–
	На границе полосы отчуждения	1,6	–

Страна, организация	Воздействие	Предельно допустимые уровни напряженностей	
		электрических полей, кВ/м	магнитных полей, кА/м
Япония	Технический стандарт для ВЛ 275 кВ	7	–
Австралия	Общие рекомендации по сооружению ВЛ		
Новый Южный Уэльс	ВЛ 500 кВ на границе полосы отчуждения	2	–
Виктория	<i>Исключительные условия:</i>		
	ВЛ 500 кВ:		
	внутри полосы отчуждения	10	–
	на границе полосы отчуждения	5	–
	ВЛ 220 кВ:		
	внутри полосы отчуждения	5	–
	на границе полосы отчуждения	2	–
	<i>Обычные условия:</i>		
	ВЛ 500 кВ:		
	внутри полосы отчуждения	5	–
	на границе полосы отчуждения	2	–
	ВЛ 220 кВ:		
	внутри полосы отчуждения	2,5	–
	на границе полосы отчуждения	1	–

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**проведения экспериментальных работ**  
**по определению ЭМО**

на \_\_\_\_\_  
 (наименование объекта)

1. Общие положения по проведению работ:
  - 1.1. Объекты выполнения обследования электромагнитной обстановки.
  - 1.2. Основание для проведения обследования.
  - 1.3. Цель обследования.
2. Условия обеспечения безопасного проведения работ:
  - 2.1. Порядок организации работ.
  - 2.2. Лица, ответственные за проведение работ.
3. Действия персонала в аварийных ситуациях.
4. Порядок проведения работ.

№ п/п	Наименование работы	Время	Исполнитель	Контролирующее лицо
4.1	Обследование заземляющего устройства			
4.2	Длительная регистрация помех			
4.3	Измерения помех при коммутациях оборудования высокого напряжения			
4.4	Измерения напряженности электромагнитных полей радиочастотного диапазона			
4.5	Измерения магнитных полей промышленной частоты			
4.6	Выполнение имитационных испытаний			
4.7	Измерение потенциалов статического электричества			

5. Оценка полноты выполненных работ, предусмотренных программой.
6. Оформление результатов выполненной работы. Результаты работ представляют в виде отчета и протоколов.

**ПРОТОКОЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ**

\_\_\_\_\_ Заказчик \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ (наименование организации, предприятия) \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ Объект \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ Лицензия № \_\_\_\_\_ по адресу \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ Действительна до \_\_\_\_\_

**Протокол № 1**

**Токи и напряжения промышленной частоты при коротком или двойном замыкании на землю**

№ кабеля, устройство	Трасса кабеля	Место приложения воздействия	Расчетно-экспериментальные воздействия		Время воздействия, с	Допустимый уровень воздействия		Вызовы	Рекомендации
			Наибольшее напряжение на кабеле или устройстве, кВ	Наибольший ток в экране, оболочке или броне кабеля, А		Наибольшее напряжение на кабеле или устройстве, кВ	Наибольший ток в экране, оболочке или броне кабеля, А		
Место и измерения, расчета (ток КЗ, кА)									

Температура воздуха	Влажность воздуха	Атмосферное давление
Измерения проведены приборами типа	Заводской номер	Дата поверки
Расчеты проведены по программе	№ регистрации	

Заключение: \_\_\_\_\_  
 Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Утверждаю: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (наименование организации, предприятия)

Заказчик \_\_\_\_\_

Объект \_\_\_\_\_

по адресу \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_

Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 2 Импульсные помехи, вызванные подъемом потенциала ЗУ

Кабель (вид цепей) устройство	Оборудование, от которого присоединяются цепи к устройству	Имитация ВЧ-составляющей тока КЗ				Расчетно-эксперимен- тальные воздействия		Степень жесткости испытаний, (или допустимый уро- вень воздействия, кВ)	Выводы	Рекомендации
		Ток генератора, А	$f_c$ , МГц	$Z_{\text{зам,обор}}$ Ом	$K_{\text{перед}}$ о.е.	$I_{\text{вч}}$ кА	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ			
Место измерения, расчета (РЦ, ГЩУ)										

Температура воздуха	Влажность воздуха	Атмосферное давление
Измерения проведены приборами типа	Заводской номер	Дата поверки
Расчеты проведены по программе	№ регистрации	

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (наименование организации, предприятия)

Заявитель \_\_\_\_\_

Объект \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_

по адресу \_\_\_\_\_

Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 3 Импульсные излучаемые помехи

Кабель (вид цепей), устройство	Трасса прокладки кабеля (№ трассы)	Коэффициент экранирования, о.е.	Расчетно-экспериментальные воздействия				Степень жесткости испытаний, (или допустимый уровень воздействия, кВ)	Выводы	Рекомендации
			При коммутациях		При КЗ				
			Вид коммутации	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ	Место КЗ	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ			
Место измерения, расчета (РПЦ, ГЩУ)									

## Импульсные помехи при натуральных коммутациях и коротком замыкании

№ шкафа (панели)	Вид цепей (устройство)	Клеммы	Коммутации		КЗ		Степень жесткости испытаний, (или допустимый уровень воздействия, кВ)	Выводы	Рекомендации
			Вид коммутации	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ	Место КЗ	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ			

Температура воздуха \_\_\_\_\_

Влажность воздуха \_\_\_\_\_

Атмосферное давление \_\_\_\_\_

Измерения проведены приборами типа \_\_\_\_\_

Заводской номер \_\_\_\_\_

Дата поверки \_\_\_\_\_

Расчеты проведены по программе \_\_\_\_\_

№ регистрации \_\_\_\_\_

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели: \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю: \_\_\_\_\_

И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Заявщик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 по адресу \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

(наименование организации, предприятия)

### Протокол № 4 Импульсные излучаемые помехи при ударах молнии

Кабель (вид цепей), устройство	Трасса прокладки кабеля (№ трассы)	Коэффициент экранирования, о.е.	Наибольшее напряжение на кабеле, кВ	Наибольшее напряжение на устройстве, кВ	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, кВ)	Выводы	Рекомендации
Место измерения, расчета (РЦ)							

Температура воздуха	Влажность воздуха	Атмосферное давление
Измерения проведены приборами типа	Знаковой номер	Дата поверки
Расчеты проведены по программе	№ регистрации	

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю: \_\_\_\_\_

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 по адресу \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

### Протокол № 5 Импульсные напряжения, воздействующие на контрольные кабели при ударах молнии

№ молниеприемника	Трасса прокладки кабелей (№ трассы)	Ток молнии, кА	Длительность фронта импульса, мкс	Наибольшее напряжение между ЗУ и кабелем, кВ	Допустимый уровень воздействия, кВ	Выводы	Рекомендации
Место измерения, расчета (РУ, здание, сооружение)							

Температура воздуха	Влажность воздуха	Атмосферное давление
Измерения произведены приборами типа	Знаковый номер	Дата поверки
Расчеты произведены по программе	№ регистрации	

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения произвели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 по адресу \_\_\_\_\_

(наименование организации, предприятия)  
 Лицензия № \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 6 Электростатический потенциал тела человека

Помещение	Тип покрытия пола	Измерения			Расчетно-экспериментальное значение			Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, кВ)	Выводы	Рекомендации
		Влажность, %	Температура, °C	Потенциал тела человека, кВ	Влажность, %	Температура, °C	Наибольший потенциал тела человека, кВ			
Температура воздуха										
Измерения проведены приборами типа										
Расчеты проведены по программе										

Температура воздуха	Влажность воздуха	Атмосферное давление
Измерения проведены приборами типа	Заводской номер	Дата поверки
Расчеты проведены по программе	№ регистрации	

Заключение: \_\_\_\_\_  
 Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Утверждаю: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 (наименование организации, предприятия)  
 \_\_\_\_\_  
 Лицензия № \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 по адресу \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Протокол № 7**  
**Электромагнитные поля радиочастотного диапазона**

Рабочее помещение	Частота, МГц; источник поля	Наибольшая напряженность, В/м	Степень жесткости (или допустимый уровень воздействия, В/м)	Выводы	Рекомендации

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели:      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

   Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю:                      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 (наименование организации, предприятия)

Заказчик \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_ по адресу \_\_\_\_\_

Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 8 Магнитные поля промышленной частоты

Место измерения, расчета	Наибольшая напряженность, А/м	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, А/м)	Выводы	Рекомендации
Нормальный режим (расчетный ток)				
Аварийный режим (расчетный ток)				

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели:      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю:      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (наименование организации, предприятия)  
 \_\_\_\_\_  
 Лицензия № \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 по адресу \_\_\_\_\_

**Протокол № 9**  
**Импульсные магнитные поля**

Источник поля	Место измерения, расчета	Наибольшая напряженность, А/м	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, А/м)	Выводы	Рекомендации

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 (наименование организации, предприятия)

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 Лицензия № \_\_\_\_\_ по адресу \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 10

### Кондуктивные помехи радиочастотного диапазона

Вид цепей, устройство	Наибольшее напряжение, В	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, В)	Выводы	Рекомендации
Место измерения				

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели:      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю:              Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 (наименование организации, предприятия)

Заказчик \_\_\_\_\_  
 Объект \_\_\_\_\_  
 Лицензия № \_\_\_\_\_ по адресу \_\_\_\_\_  
 Действительна до \_\_\_\_\_

## Протокол № 11

### Кондуктивные помехи в цепях постоянного оперативного тока

Вид цепей	Пulsации в постоянном оперативном токе		Импульсные помехи в постоянном оперативном токе		Выводы	Рекомендации
	Наибольший уровень пульсаций, %	Допустимый уровень пульсаций, %	Наибольшее напряжение, кВ	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, В)		

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели:      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
    Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_  
 Утверждаю:                      Должность \_\_\_\_\_      И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (наименование организации, предприятия)

Заказчик \_\_\_\_\_

Лицензия № \_\_\_\_\_

Объект \_\_\_\_\_

Действительна до \_\_\_\_\_

по адресу \_\_\_\_\_

## Протокол № 12

### Взаимное влияние кабелей на низкой частоте

Кабель (вид цепей), устройство	Частота, Гц	Наибольшее напряжение, В	Степень жесткости испытаний (или допустимый уровень воздействия, В)	Выводы	Рекомендации
Место измерения					

Температура воздуха		Влажность воздуха		Атмосферное давление	
Измерения проведены приборами типа		Заводской номер		Дата поверки	
Расчеты проведены по программе		№ регистрации			

Заключение: \_\_\_\_\_

Измерения провели: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

Утверждаю: Должность \_\_\_\_\_ И.О. Фамилия \_\_\_\_\_

---

---

## СТЕПЕНИ ЖЕСТКОСТИ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

---

---

Устройства АСТУ проходят испытания на устойчивость к воздействиям электромагнитных помех в соответствии с базовым нормативно-техническим документом в области электромагнитной совместимости: ГОСТ Р 51317.6.5 (МЭК 61000-6-5-2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний. В этом документе рассматриваются практически все виды испытаний. По отдельным видам испытаний (в более подробном изложении) выпущены серии ГОСТ Р 51317.4 (МЭК 61000-4), а также ГОСТ 30804.4 (МЭК 61000-4) и ГОСТ IEC 60255.

### П6.1. Воздействие напряжения промышленной частоты

Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме) для устройств РЗА проводят подачей напряжения (табл. П6.1) в соответствии ГОСТ IEC 60255-5–2014.

*Таблица П6.1*

**Испытательные напряжения переменного тока**

Номинальное напряжение установки, В	Испытательное напряжение переменного тока, кВ
До 630	0,5
125–500	2,0
630	2,3
800	2,6
100	3,0

## П6.2. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях на шинах распределительного устройства

На устойчивость к затухающим колебаниям (частотой 0,1 и 1 МГц) устройства испытывают в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.12-99.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. П6.2.

*Таблица П6.2*

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии напряжением затухающих колебаний

Степень жесткости	Синфазное напряжение, кВ	Противофазное напряжение, кВ
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2,5	1
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

## П6.3. Импульсные помехи при ударах молнии

Испытания на устойчивость к воздействию импульсных помех от токов молнии проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5-99.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. П.6.3. Испытания изоляции устройств РЗА импульсным напряжением проводят приложением импульсного напряжения, максимальное значение которого должно быть следующим: 0; 1; 5 кВ (допуск: от +0 до -10%), как указано в МЭК 255.

*Таблица П6.3*

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии импульсом напряжения 1/50 мкс (1,2/50 мкс)

Степень жесткости	Амплитуда импульса напряжения, кВ, ±10 %
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
Специальная	По согласованию между производителем и потребителем

## П6.4. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона

Испытания на устойчивость к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям проводят в соответствии с ГОСТ 30804.4.3–2013. Требования помехоустойчивости устанавливают отдельно: при воздействии излучений от стационарных радио- и телевизионных передатчиков, радиопередатчиков подвижных объектов, от различных промышленных источников излучений; при воздействии помехоэмиссии от цифровых радиотелефонов.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. П6.4–6.6.

Таблица П6.4

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии радиочастотным электромагнитным полем в диапазоне частот от 80 до 1000 МГц

Степень жесткости	Напряженность электромагнитного поля, В/м (дБ)
1	1 (120)
2	3 (130)
3	10 (140)
4	По согласованию между потребителем и производителем

Таблица П6.5

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии радиочастотным электромагнитным полем в диапазоне частот от 800 до 960 МГц и от 1,4 до 2 ГГц

Степень жесткости	Напряженность электромагнитного поля, В/м (дБ)
1	1 (120)
2	3 (130)
3	10 (140)
4	30 (150)
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

В табл. П6.6 приведены примеры степеней жесткости испытаний и соответствующих защитных расстояний. Защитное расстояние представляет собой минимально допустимое расстояние между устройством и цифровым радиотелефоном, соответствующее установленной степени жесткости испытания.

**Примеры степеней жесткости испытаний  
и соответствующих защитных расстояний**

Степень жесткости испытаний	Напряженность поля в отсутствие модуляции, В/м	Максимальное среднеквадратичное значение напряженности поля, В/м	Защитное расстояние, м, при излучении, Вт		
			2 (С5М)	8 (О8М)	4 (ДЕСТ)
1	1	1,8	5,5	11	1,9
2	3	5,4	1,8	3,7	0,6
3	10	18	0,6	1,1	–
4	30	54	0,4	0,4	–

### П6.5. Разряды статического электричества

Испытания на помехоустойчивость к разрядам статического электричества (ГОСТ 30804.4.2–2013 (IEC 61000-4-2–2008)) проводят как при контактном, так и при искровом воздушном разряде непосредственно на испытуемый объект.

Применяют степени жесткости испытаний, приведенные в табл. П6.7.

Таблица П6.7

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний разрядами статического электричества

Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ	
	Контактный разряд	Воздушный разряд
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Сведения о влиянии относительной влажности и материалов напольных покрытий на уровень напряжения, до которого может быть заряжено тело человека, приведены в табл. П6.8.

Таблица П6.8

**Уровни потенциала человека, обусловленные  
статическим электричеством при различных материалах и влажности**

Степень жесткости	Относительная влажность, не выше	Антистатический материал	Синтетический материал	Максимальное напряжение, кВ
1	35	Ч	–	2
2	10	Ч	–	4
3	50	–	Ч	8
4	10	–	Ч	15

### П6.6. Магнитные поля промышленной частоты

Испытания на помехоустойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты проводят в соответствии ГОСТ Р 50648–94 (МЭК 1000-4-8–93).

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к магнитному полю промышленной частоты приведены в табл. П6.9.

Таблица П6.9

**Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний  
при воздействии магнитным полем промышленной частоты**

Степень жесткости	Напряженность магнитного поля, А/м	
	Магнитное поле постоянной интенсивности	Кратковременное магнитное поле (длительность 1–3 с)
1	1	–
2	3	–
3	10	–
4	30	300
5	100	1000
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

## П6.7. Импульсные магнитные поля

Испытания на помехоустойчивость к импульсному магнитному полю проводят в соответствии с ГОСТ Р 50649–94 (МЭК 1000-4-10–93).

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к импульсному магнитному полю приведены в табл. П6.10.

Таблица П6.10

### Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии импульсным магнитным полем

Степень жесткости	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	–
2	–
3	100
4	300
5	1000
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

## П6.8. Помехи, связанные с возмущениями в цепях электропитания АСТУ постоянного и переменного тока

Испытания на помехоустойчивость к помехам в цепях электропитания проводят в соответствии с МЭК 61000-4-29–2016, ГОСТ Р 51317.4.17–2000 (МЭК 61000-4-17–99), ГОСТ 30804.4.11–2013 (МЭК 61000-4-11–2004), ГОСТ 30804.4.13–2013 (МЭК 61000-4-13–2002), ГОСТ Р 51317.4.14–2000 (МЭК 61000-4-14–2000), ГОСТ Р 51317.4.28–2000 (МЭК 61000-4-28–2000) и др. Испытания проводят на помехоустойчивость к гармоникам, интергармоникам, сигналам систем телеуправления и сигнализации, колебаниям напряжения, провалам напряжения и кратковременным перерывам питания, несимметрии напряжений, изменениям частоты питания, составляющим постоянного тока в электрических сетях переменного тока.

Испытания на помехоустойчивость к импульсам напряжения 100/1300 мкс, возникающим при перегорании плавких предохранителей, проводят в соответствии с ГОСТ 29280–92.

Амплитуду испытательного импульса принимают в 1,3 раза большей, чем номинальное напряжение сети электропитания.

Испытания на помехоустойчивость к наносекундным импульсным помехам, возникающим в результате процессов коммутации, проводят в соответствии с ГОСТ 30804.4.4–2013 (МЭК 61000-4-4–2004).

Степени жесткости испытаний приведены в табл. П6.11.

*Таблица П6.11*

**Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний  
пачками импульсов**

Степень жесткости	Амплитуда импульсов выходного напряжения ненагруженного испытательного генератора, кВ	
	Цепи силового электропитания	Сигнальные цепи ввода–вывода
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Испытания на помехоустойчивость к колебательным затухающим помехам частотой 100 кГц проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.12.

Применяют степени жесткости испытаний, приведенные в табл. П6.12.

*Таблица П6.12*

**Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний  
при воздействии колебательными затухающими импульсами**

Степень жесткости	Синфазное напряжение, кВ	Противофазное напряжение, кВ
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Испытания на помехоустойчивость к затухающему колебательному магнитному полю, которое возникает при коммутациях на шинах высокого напряжения выключателями и разъединителями, проводят в соответствии с ГОСТ Р 50652–94.

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к затухающему колебательному магнитному полю даны в табл. Пб.13.

Таблица Пб.13

**Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний  
при воздействии затухающим колебательным магнитным полем**

Степень жесткости	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	–
2	–
3	10
4	30
5	100
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Испытания на устойчивость к пульсациям напряжения постоянного тока, воздействующим на порты электропитания постоянного тока, и формы испытательных напряжений установлены в ГОСТ Р 51317.4.17–2000. Жесткость испытаний определяется размахом пульсаций напряжения, выраженным в процентах от номинального напряжения электропитания постоянного тока.

Степени жесткости испытаний при воздействии помех на порт электропитания постоянного тока приведены в табл. Пб.14.

Таблица Пб.14

**Степени жесткости испытаний  
при воздействии пульсаций напряжения**

Степень жесткости испытаний	Размах пульсаций напряжения (по отношению к номинальному напряжению электропитания), %
1	2
2	5
3	10
4	15
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Испытания на устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц, воздействующим на порты электропитания и ввода–вывода сигналов, проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.6–99.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. П.6.15.

**Степени жесткости испытаний в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц**

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение	
	дБ	В
1	120	1
2	130	3
3	140	10
Специальное	По согласованию между потребителем и производителем	

Испытания на помехоустойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.16–2000. Помехи, представляющие собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, наводятся в цепях релейной защиты, противоаварийной автоматики и технологического управления от близко расположенных силовых кабелей или заземляющих проводников. В зависимости от источника возникновения кондуктивные помехи, представляющие собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, подразделяют на два вида: постоянное напряжение и напряжение частотой 50 Гц; напряжение в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц (включая гармоники основной частоты сети).

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость при воздействии кондуктивных помех постоянного тока на порты устройств, на частоте 50 Гц и в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц представлены в табл. Пб.16–6.18.

При испытаниях на помехоустойчивость к кратковременным помехам время воздействия помехи составляет 1 с.

**Степени жесткости испытаний при воздействии длительных помех постоянного тока и на частоте 50 Гц**

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В
1	1
2	3
3	10
4	30
Специальное	По согласованию между потребителем и производителем

Таблица Пб.17

**Степени жесткости испытаний на устойчивость  
при воздействии кратковременных помех постоянного тока  
и на частоте 50 Гц**

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В
1	3
2	10
3	30
4	100
Специальное	По согласованию между потребителем и производителем

Таблица Пб.18

**Степени жесткости испытаний при воздействии длительных помех  
в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц**

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В в полосе частот			
	15–150 Гц	150 Гц–1,5 кГц	1,5–15 кГц	15–150 кГц
1	1–0,1	0,1	0,1–1	1
2	3–0,3	0,3	0,3–3	3
3	10–1	1	1–10	10
4	30–3	3	3–30	30
Специальное	По согласованию между потребителем и производителем			

Требования помехоустойчивости на частотах ниже 15 Гц не устанавливают (исключая помехи постоянного тока), так как на указанных частотах помехи не считаются существенными.

---

---

## ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВАМ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

---

---

### П7.1. Воздействие токов и напряжений промышленной частоты

Технические средства, используемые для определения токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на АСТУ при КЗ на землю, должны обеспечить возможность составления реальной схемы ЗУ, имитации КЗ на землю и измерения токов и напряжений в условиях действующего энергообъекта.

Для проведения измерений при имитации КЗ на землю рекомендуется применять приборы, указанные в «Методических указаниях по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00», или приборы с аналогичными техническими характеристиками.

### П7.2. Воздействие импульсных помех

Технические средства, используемые для определения импульсных помех, воздействующих на АСТУ при коммутациях и КЗ на землю, должны обеспечить имитацию воздействия высокочастотных импульсных токов и электромагнитных полей, а также измерение импульсных токов и напряжений. Для имитаций импульсных помех может применяться генератор, обеспечивающий колебательный затухающий импульс тока с амплитудой в интервале от 2 до 20 А, декрементом колебания 3–5, с частотой колебаний в диапазоне от 0,1 до 10 МГц, с напряжением на выходе генератора не менее 500 В.

Для проведения измерений при коммутациях силового оборудования рекомендуется применять осциллографы с полосой пропускания не менее 10 МГц для объектов с ОРУ и не менее 50 МГц для объектов с КРУЭ, например осциллограф FLUKE-199. Для проведения имитаций высокочастотных воздействий может применяться измерительный комплекс ИКП-1 (НПФ ЭЛНАП, МЭИ, Москва).

### П7.3. Воздействие молнии

Технические средства, используемые для определения воздействия молнии, должны обеспечить определение схемы растекания тока молнии по устройству молние-

защиты, имитацию воздействия аperiodических затухающих импульсных токов и измерение импульсных токов и напряжений при имитации. Генератор импульсных токов должен обеспечить при выходном напряжении не менее 200 В импульсы тока, как минимум с двумя значениями времени фронта импульса, отличающимися более чем в 3 раза в диапазоне времени от 0,25 до 10 мкс.

Для проведения имитаций может быть рекомендован измерительный комплекс ИК-1 (НПФ ЭЛНАП, МЭИ, Москва).

#### **П7.4. Поля радиочастотного диапазона**

Для измерения помех в радиочастотном диапазоне от 1 до 1000 МГц обычно используют перестраиваемые селективные высокочастотные вольтметры с соответствующим набором антенн.

Для сигналов вертикальной поляризации в диапазоне 26–300 МГц возможно использование биконических антенн с круговой диаграммой направленности и входным сопротивлением 50 Ом. Для сигналов с горизонтальной поляризацией используют дипольные антенны с входным сопротивлением 50 Ом. Существенным для правильных измерений является хорошее согласование антеннофидерного тракта с вольтметром во всем диапазоне измеряемых частот. Значение коэффициента стоячей волны напряжения не должно превышать 3. Для измерения сигналов в диапазоне частот 300–1000 МГц возможно использование калиброванной измерительной антенны, рупорной измерительной антенны П-6-33 с входным сопротивлением 50 Ом.

Для сигналов с горизонтальной поляризацией используют также калиброванную широкополосную антенну в виде конического диполя ДП-3, входящую в измерительный комплекс FSM-8,5. Указанные антенны предназначены для измерения напряженности электрического компонента электромагнитного поля. Магнитный компонент поля определяют пересчетом по формуле

$$H, \text{ дБ (мкА/м)} = E, \text{ дБ (мкВ/м)} - 52.$$

Возможность быстрого графического представления частотного спектра помех дает применение спектроанализаторов для измерений радиочастотных сигналов. Простейшим прибором этого класса является переносной спектроанализатор Protek-3200.

#### **П7.5. Магнитные поля промышленной частоты**

Для измерения магнитного поля промышленной частоты целесообразно применять приборы, позволяющие измерять магнитные поля напряженностью от 0,01 до 1000 А/м. Могут применяться, например, приборы: ТП2-2У, МПМ-2 (ГП ВНИИФТРИ, Россия); ПЗ-50 (СКБ РИАП, Россия); ЕТМ-1 (Wandel & Goltermann, Германия).

#### **П7.6. Статическое электричество**

Для измерения потенциала тела человека может применяться статический вольтметр, например С 502. Для измерений удельного поверхностного и объемного сопротивлений изоляционных материалов может применяться тераомметр, например Е6-13.

### **П7.7. Кондуктивные помехи радиочастотного диапазона**

Для измерений кондуктивных помех радиочастотного диапазона может применяться осциллограф с полосой пропускания не менее 100 МГц, например FLUKE-199.

### **П7.8. Пульсации и кондуктивные помехи в цепях питания постоянным напряжением**

Для измерений пульсаций и кондуктивных помех может применяться осциллограф с полосой пропускания не менее 10 МГц.

### **П7.9. Длительные измерения**

Для длительных измерений могут применяться осциллограф с полосой пропускания не менее 50 МГц и специальные регистраторы, позволяющие измерять импульсные помехи и сохранять в памяти зарегистрированные значения (например, регистратор событий FLUKE-VR-101S).

## ИМИТАЦИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

### П8.1. Имитация КЗ с помощью реостатов

Измерение распределения напряжения по заземлителю при имитации растекания токов КЗ через нейтралы трансформаторов проводят в соответствии со схемой рис. П8.1а (первый этап), а при имитации растекания токов в энергосистему – в соответствии со схемой рис. П8.1б (второй этап). Проведение имитации в 2 этапа связано с тем, что при одновременной имитации ток, уходящий через заземлитель в энергосистему, будет на порядок меньше, чем ток в нейтралы трансформаторов.

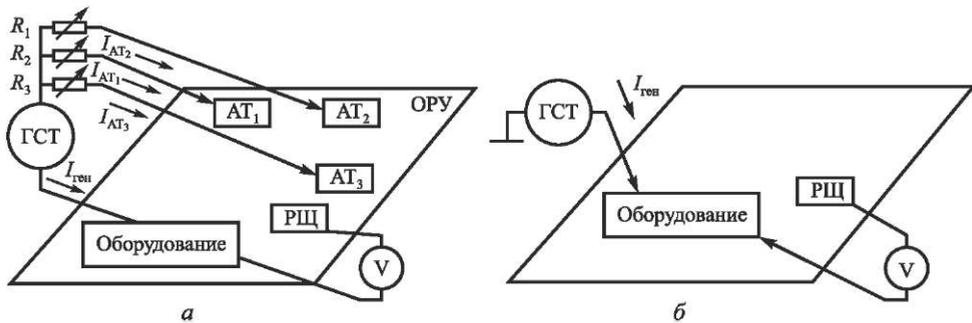


Рис. П8.1. Схема для имитации КЗ на высоковольтном оборудовании

Например, при КЗ имеется следующее распределение токов: в месте КЗ – 10 кА; нейтраль АТ1 – 3 кА; нейтраль АТ2 – 3 кА, нейтраль АТ3 – 2 кА; энергосистема – 2 кА. Тогда при токе генератора  $I_{ген} = 4$  А (имитирует ток в месте КЗ) при помощи реостатов  $R_1, R_2$  и  $R_3$  устанавливают ток в нейтралы АТ1  $I_{АТ1} = 1,5$  А, в нейтралы АТ2  $I_{АТ2} = 1,5$  А, в нейтралы АТ3  $I_{АТ3} = 1$  А.

### П8.2. Пересчет измеренных при имитации КЗ токов и напряжений реальным значениям тока КЗ

Полученные результаты измерений пересчитывают к реальным значениям тока КЗ. Если имитация проводилась с помощью аппаратуры, которая генерирует переменный ток с частотой отличающейся от 50 Гц более чем на 20 %, результаты измерений

пересчитывают к частоте 50 Гц. Для пересчета используют зависимости коэффициента пересчета  $K_f$  от сечения заземлителей  $S$ . Напряжение на частоте 50 Гц  $U_{50} = U_f/K_f$ , где  $U_f$  – измеренное напряжение на частоте  $f$ .

Затем пересчитывают результаты измерений к реальному току КЗ. Пусть при имитации растекания части тока КЗ по нейтралям трансформаторов было получено (здесь и далее – с учетом пересчета к частоте 50 Гц) напряжение 0,3 В между РЩ и оборудованием. При имитации части тока КЗ, уходящего в энергосистему, ток генератора составил 0,15 А, напряжение 0,02 В.

При этом составляющая разности потенциалов между оборудованием и РЩ, обусловленная растеканием тока по нейтралям, при КЗ равна 600 В. Составляющая разности потенциалов от тока в энергосистему равна 266 В.

Суммарное напряжение между оборудованием и РЩ при КЗ составляет 866 В.

Это напряжение будет воздействовать на изоляцию контрольных кабелей, проложенных от рассматриваемого элемента оборудования до РЩ. Это же напряжение будет определять ток по заземленному с обеих сторон экрану кабеля от данного оборудования до РЩ.

По плану прокладки кабельных каналов или кабельному журналу определяют длину кабеля  $L_{\text{каб}}$  и производят расчет сопротивления экрана кабеля  $R_s$  (индуктивным сопротивлением можно пренебречь).

Ток в экране кабеля при КЗ определяют как отношение напряжения между оборудованием и РЩ к сопротивлению экрана кабеля.

Полученный ток в экране сравнивают с допустимым значением. Допустимый ток рассчитывают по выражению:

$$I_{\text{доп } t} = k \frac{100}{\sqrt{0,09 + t}},$$

где  $t$  – время протекания тока;  $k = 1$  для  $t < 1$  с,  $k = 0,8$  для  $t > 1$  с.

## ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТНЫМ ПРОГРАММАМ

### П9.1. Расчет заземляющих устройств

Программы расчета заземляющих устройств должны моделировать в разветвленной трехмерной схеме заземляющего устройства с системой проводников (электродов) в воздухе, грунте и объемных заглубленных тел переходные процессы, обусловленные КЗ на землю, ударами молнии в молниеприемники и коммутациями силового оборудования. В результате расчетов должны быть определены токи и напряжения в заземляющем устройстве; сопротивление растеканию тока заземляющего устройства; напряжения прикосновения и шага; распределение потенциала в вертикальном сечении грунта и по поверхности земли.

Для проверки программы рекомендуются тестовые задачи, приведенные далее.

При составлении тестовых задач использовались известные аналитические выражения из литературы (В.В. Бургсдорф, А.И. Якобе «Заземляющие устройства электроустановок») и результаты экспериментов, проведенных сотрудниками МЭИ и НПФ ЭЛНАП.

Далее в тексте используются следующие обозначения:

$l$  – длина электрода, м;  $r$  – радиус электрода, м;  $s$  – расстояние от электрода до поверхности земли, м;  $\rho$  – удельное сопротивление однородного грунта, Ом·м;  $\rho_1$  – удельное сопротивление верхнего слоя неоднородного грунта, Ом·м;  $\rho_2$  – удельное сопротивление нижнего слоя неоднородного грунта, Ом·м;  $h$  – глубина раздела слоев, м;  $R_p$  – сопротивление растеканию тока заземлителя, Ом.

#### Задача 1

#### *Простые заземлители в однородном грунте*

*Таблица П9.1*

#### Расчетные параметры для электрода в однородном грунте

Расположение электрода	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное
$r$ , м	0,006	0,006	0,006
$l$ , м	2	2	2
$s$ , м	0	1	2
$\rho_1$ , Ом·м	400	400	400
$\rho_2$ , Ом·м	100	100	100
$h$ , м	2	2	2

Расчеты по программе не должны отличаться более, чем на 5 % от приведенных в табл. П9.2.

Таблица П9.2

**Результаты расчета сопротивления растеканию тока**

Расположение электрода	Вертикальное	Горизонтальное
$R_p$ , Ом	21,8	25,2

**Задача 2**

**Простые заземлители в двухслойном грунте**

Таблица П9.3

**Расчетные параметры для электрода в двухслойном грунте**

Расположение электрода	Вертикальное	Горизонтальное
$r$ , м	0,006	0,006
$l$ , м	5	5
$s$ , м	0,5	0,5
$\rho$ , Ом·м	100	100

Таблица П9.4

**Результаты расчета сопротивления растеканию тока**

Расположение электрода	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное
$R_p$ , Ом	190,9	74,98	49,49

Расчеты по программе не должны отличаться более, чем на 5 % от приведенных в табл. П9.4.

**Задача 3**

**Сложные заземлители в однородном грунте**

Заземлители (рис. П9.1) с размерами в плане  $40 \cdot 40$  м<sup>2</sup> состоят из горизонтальных электродов радиусом 0,01 м заложённых на глубине 0,5 м и вертикальных электродов радиусом 0,01 м и длиной 5 м. Грунт однородный с удельным сопротивлением 100 Ом·м.

Суммарный ток, стекающий с заземлителей в грунт, составляет 1000 А.

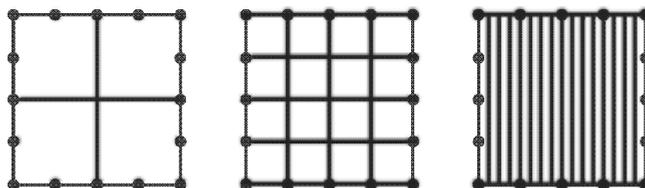


Рис. П9.1. Сложные заземлители

## Результаты расчета сопротивления растеканию тока

Схема	6	7	8
$R_p, \text{ Ом}$	1,20	1,12	1,07

Максимальные потенциалы на поверхности грунта  
в центре заземлителя

Схема	6	7	8
Потенциал, В	825	890	980

Расчеты по программе не должны отличаться более чем на 5 % от приведенных в табл. П8.5, 8.6.

Указанным требованиям отвечает, например, программа «ОРУ-М» (НПФ ЭЛНАП, Москва).

## П9.2. Расчет импульсных помех

Программа для расчета импульсных помех должна:

- моделировать электромагнитные переходные процессы в кабельной линии, возникающие при ударе молнии в непосредственной близости от кабельной линии, при протекании импульсных токов по близлежащим тоководам, моделировать распределение потенциалов в заземляющих устройствах при протекании импульсных токов;
- учитывать при моделировании волновые процессы в кабельных линиях, свойства грунта, наличие в грунте сетки заземления, коммутационные переходные процессы в близлежащих тоководах, расположение кабельной линии как в воздухе, так и в грунте, взаимное экранирование проводов в кабельных линиях, особенности включения линии на ее концах.

Погрешность результатов расчета по программе не должна превышать 20 %.

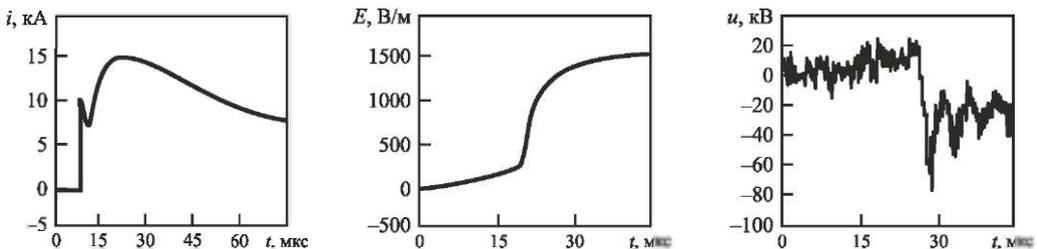
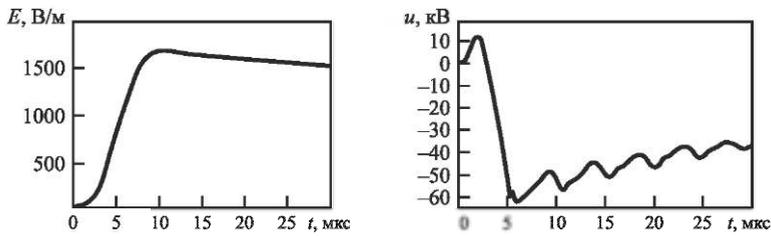


Рис. П9.2. Осциллограммы тока молнии, напряженности электрического поля молнии и напряжения наводки на воздушной линии

Для проверки программы ниже приведена тестовая задача. Воздушная линия протяженностью 448 м располагается на высоте 1 м над землей. Молния ударяет в землю

на расстоянии 20 м от одного из ее концов вдоль линии. Регистрировались ток молнии, вертикальная составляющая напряженности электрического поля молнии на расстоянии 500 м от места ее удара и напряжение, наведенное на воздушной линии. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. П9.2, а расчет по программе на рис. П9.3.



**Рис. П9.3. Расчет напряженности электрического поля молнии и напряжения наводки на воздушной линии по программе**

Указанным требованиям отвечает, например, программа Interferences (НПФ ЭЛНАП, Москва).

---

---

## РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЭМО

---

---

### П10.1. Снижение уровней воздействующих токов и напряжений промышленной частоты

Если напряжения и токи промышленной частоты превышают допустимые значения, разрабатывают мероприятия по реконструкции заземляющего устройства.

1.1. Определяют те участки заземлителя, на которых происходит наибольшее падение напряжения, и в таких местах прокладывают дополнительные горизонтальные заземлители.

1.2. Для снижения потенциала на оборудовании прокладывают дополнительные проводники от оборудования к магистральным заземлителям, снизив сопротивление связи оборудования с сеткой заземляющего устройства. Наиболее эффективно сопротивление связи оборудования с заземлителем снижается при четырех параллельных связях оборудования с заземляющим устройством.

1.3. Если прокладка дополнительных горизонтальных заземлителей сетки заземляющего устройства не дает требуемого эффекта, снижают сопротивление растеканию тока всего объекта. Для этого устанавливают дополнительные вертикальные заземлители или выполняют выносной заземлитель. Установка вертикальных заземлителей эффективна только при наличии слоев грунта с низким удельным сопротивлением и при небольших размерах заземляющего устройства.

1.4. Для снижения токов в экранах, оболочках и броне кабелей прокладывают параллельно кабельной трассе дополнительные заземлители на расстоянии (0,5–1,0) м от кабельного канала или лотка.

1.5. Эффективность указанных мероприятий проверяют с помощью расчетов.

### П10.2. Снижение уровня импульсных помех

Если для какого-либо вида цепей установлено, что уровень импульсных помех при коммутациях, КЗ и ударах молнии превышает допустимые значения, для снижения помех в этих цепях проводят следующие мероприятия.

2.1. Прокладывают дополнительные проводники от оборудования к магистральным заземлителям.

2.2. Применяют экранированные кабели с заземлением экранов с обеих сторон.

2.3. Заземляют цепи напряжения на релейном щите (если это позволяют технические условия) или смещают места заземления на некоторое расстояние от оборудования высокого напряжения и порталов.

2.4. Для ограничения уровня помех на входе устройств устанавливают специальные средства ограничения перенапряжений.

2.5. Если указанные мероприятия окажутся неэффективными для снижения уровней импульсных помех от молнии, проводят реконструкцию системы молниезащиты энергообъекта.

### **П10.3. Снижение уровня воздействующих электромагнитных полей**

3.1. Снижение уровней электромагнитных полей радиочастотного диапазона от внешних источников и стационарных станций достигается за счет экранирования зданий или применения экранов в местах установки аппаратуры.

3.2. Если уровни электромагнитных полей от переносных радиопередающих станций превышают допустимые значения, предусматривают организационные мероприятия, исключающие использование таких станций в местах установки устройств АСТУ.

3.3. Для снижения уровня воздействия магнитного поля промышленной частоты изменяют место размещения устройств или перемещают источник магнитного поля на большее расстояние от устройств.

3.4. Если мероприятия по экранированию устройств от воздействий импульсных магнитных полей при ударах молнии окажутся неэффективными, проводят реконструкцию системы молниезащиты энергообъекта.

### **П10.4. Защита от статического электричества**

Если уровень потенциала тела человека превышает допустимое значение, применяют антистатическое напольное покрытие или устанавливают систему, поддерживающую соответствующую влажность воздуха в помещениях, где установлены устройства АСТУ.

### **П10.5. Снижение уровня электромагнитных помех в цепях питания низкого напряжения**

Для снижения уровня электромагнитных помех в цепях питания низкого напряжения до допустимых значений применяют следующие мероприятия:

5.1. Устанавливают средства ограничения перенапряжений на источниках помех (соленоидах, катушках реле).

5.2. Устанавливают средства ограничения перенапряжений на шинах постоянного тока и на шинах собственных нужд.

5.3. Применяют специальные фильтры.

5.4. Применяют отдельное питание устройств АСТУ.

Подробнее мероприятия по улучшению электромагнитной обстановки рассмотрены в рекомендованной литературе.

## Список литературы

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. Электромагнитная совместимость электрической части атомных электростанций / Э.В. Вершков, А.В. Жуков, А.В. Калеников и др.; под ред. К.Н. Даниленко и И.П. Кужекина. – М.: Знак, 2006.
3. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов / А.Ф. Дьяков, И.П. Кужекин, Б.К. Максимов, А.Г. Темников; под ред. чл.-корр. РАН докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
4. Шваб, А. Электромагнитная совместимость / А. Шваб; пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора; под ред. И.П. Кужекина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер; пер. с нем.; И.П. Кужекина; под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
6. Кужекин, И.П. Молния и молниезащита /И.П. Кужекин и др. – М.: Знак, 2003.
7. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
8. ГОСТ Р 50746–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
9. Характерные особенности ЭМО действующих энергообъектов при внедрении микропроцессорных устройств РЗА: с докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2002» / Р.К. Борисов, М.Н. Смирнов, Я.Л. Арцишевский и др. – М.: СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002.
10. Шваб, А. Измерения на высоком напряжении / А. Шваб; пер. с нем. И.П. Кужекина. – М.: Энергоиздат, 1983.
11. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Уильямс; пер. с англ. В.С. Кармашев, Л.Н. Кечиев. – М.: Издательский дом «Технологии», 2003.
12. Уильямс, Т. ЭМС для систем и установок / Т. Уильямс, К. Армстронг; пер. с англ. В.С. Кармашев, Л.Н. Кечиев. – М.: Издательский дом «Технологии», 2003.
13. Кармашев, В.С. Электромагнитная совместимость технических средств: справочник. – М., 2001.
14. Зимин, Е.Ф. Электромагнитная совместимость информационных систем / Е.Ф. Зимин – М.: Изд-во МЭИ, 1995.

15. Надежность функционирования устройств релейной защиты и автоматики в условиях электромагнитных воздействий на энергоблоках АЭС: сб. тезисов докладов III Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» / В.Н. Сарылов, Л.В. Ярных, Я.Л. Арцишевский. – М., 2003.
16. *Sekso-Telento A., Bojic S.* Measurements of overvoltages in secondary circuits for EMC evaluation in transmission network substations // Proceedings of the XIII International Symposium on High Voltage Engineering Delft, Netherlands, 2003.
17. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525–00 РАО «ЕЭС России» – М.: ОРГРЭС, 2000.
18. Правила устройств электроустановок. Разд. 1, 4, 77-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003.
19. РД 34.21.122–87. Минэнерго СССР. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
20. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций (СО-153-34.21.122–2003). – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
21. IEC 62305-1. Protection against lightning. Part 1: General principles, 2005.
22. IEC 62305-2. Protection against lightning. Part 2: Risk management, 2005.
23. IEC 62305-3. Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard, 2005.
24. IEC 62305-4 Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures. Part 5: Services, 2005.
25. Guide on EMC in power plants and substations // Cigre, Working Group 36.04 «EMC within power plants and substations». 1997.
26. Инструкция по устройству сетей заземления и молниезащите. ВНИИПроектэлектромонтаж. Концерн «Электромонтаж». – М.: Изд-во Кенди, 1992.
27. *Геворкян, В.М.* Электромагнитная совместимость электронных информационных систем. Часть I. Общие вопросы электромагнитной совместимости технических средств / В.М. Геворкян. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.
28. *Овсянников, А.Г.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010.
29. *Schimanski, O.J.* Überspannungsschutz. Heidelberg: Huthing Verlag, 2003.
30. Основы зонной концепции молниезащиты и обеспечения электромагнитной совместимости: В сб. «Теория и практика электрических разрядов в энергетике» / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, И.П. Кужекин и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. – Пятигорск: Изд-во ЮЦПК РП «Южэнерготехнадзор», 1997.
31. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6–750 кВ: методическое и справочное пособие / М.А. Аронов, О.А. Аношин, О.И. Кондратов и др.; под ред. М.А. Аронова. – М.: Изд-во Знак, 2001.

32. *Noak F., Pospiech J.* Kurzschluss-Kenngrassen von Niederspannungsnetzen // ETZ1995H.5.
33. *Базелян, Э.М.* Поражаемость объектов молнией, интенсивность грозовой деятельности / Э.М. Базелян, А.В. Хлапов: в сб. нормативных документов и материалы конференции «Молниезащита общественных и промышленных зданий и сооружений». – СПб.: Изд-во АНО УМИТЦ, 2003.
34. *Lewis J.* Cigre Working Groop 23.10. Earthing of Gis-An Application Guide // Electra. – 1993. – № 151.
35. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна и С.А. Бажанова. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
36. Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике / под ред. В.Х. Ишкина – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
37. Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов. СТО 56947007-29.240.043–2010. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010 [приложение к журналу «Энергетик», вып. 9–10].
38. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. СТО 56947007-29.240.044–2010. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010 [приложение к журналу «Энергетик», вып. 9–10].
39. ГОСТ 51317.6.5–2006 (МЭК 61000-6-5–2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.
40. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. СО 34.35.311–2004.
41. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ. СО 153-34.20.122–2009.
42. Руководства по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений». РД 153-34.3-35.125–99.
43. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. СО 153-34-21.122–2003. – М.: МЭИ, 2003.
44. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Министерство энергетики РФ– М.: ЗАО «Энергосервис», 2003.
45. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
46. *Карякин, Р.Н.* Справочник по молниезащите / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2005.
47. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкция, сооружения): справочник / Р.К. Борисов и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

48. *Петров, С.Р.* Компьютерные программы для анализа и проектирования устройств заземления и молниезащиты / С.Р. Петров, Р.К. Борисов: В кн. «Сборник докладов». – Новосибирск, 2002.
49. *Петров, С.Р.* Расчет импульсных помех в проводах и кабельных линиях / С.Р. Петров // Технологии ЭМС. – № 1. – 2006. – С. 19–26.
50. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общей ред. чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации ЕЭЭК, 2012. Т. 1. – 696 с.

Учебное издание

**Дьяков** Анатолий Федорович  
**Максимов** Борис Константинович  
**Борисов** Руслан Константинович  
**Жуков** Андрей Васильевич  
**Кужекин** Иван Прохорович  
**Темников** Александр Георгиевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ  
И МОЛНИЕЗАЩИТА  
В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие

Редакторы Л.Я. Мельникова, Л.В. Мормыло  
Компьютерная верстка Н.А. Поповой  
Дизайн обложки Д.А. Николаевой  
При оформлении переплета использованы фотографии  
Б. Горина и Р. Борисова

---

Подписано в печать 04.06.2018	Формат 70×100/16	
Бумага мелованная	Печать офсетная	Гарнитура Таймс
Усл. печ. л. 43,0	Тираж 350 экз.	Заказ №

---

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».  
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.  
Отпечатано в типографии ООО «РПЦ Офорт».  
105118, Москва, проспект Буденного, д. 21А, стр. 2.