





КНИГА-ПОБЕДИТЕЛЬ
конкурса рукописей учебников
по направлениям
подготовки в МЭИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Г.В. Шведов

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Том 1

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

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

*Под редакцией
профессора Ю.В. Шарова*

Москва
Издательство МЭИ
2025

УДК 621.311

ББК 31.2

Ш 341

Рецензенты: А.Г. Русина, докт. техн. наук, доц., декан
факультета энергетики НГТУ;
М.Г. Ошурков, канд. техн. наук, доц., и.о. зав. каф.
электрообеспечения промышленных предприятий
НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева

Шведов, Г.В.

Ш 341 Электроэнергетические системы и сети: В 13 т. Т. 1. Расчет установившихся режимов: учебник / Г.В. Шведов; под ред. проф. Ю.В. Шарова. – М.: Издательство МЭИ, 2025. – 260 с.

ISBN 978-5-7046-3176-7

ISBN 978-5-7046-3177-4 (Т. 1)

Приведены основные теоретические сведения по схемам замещения элементов электрических сетей и их параметрам. Базируясь на знаниях теоретических основ электротехники, через построение векторных диаграмм показано решение задачи расчета режима электрических сетей. Описаны основы расчета режимов простых разомкнутых и замкнутых электрических сетей. Учебник сконструирован таким образом, что с каждым разделом постепенно наращается сложность материала.

Теоретическая часть гармонично дополнена примерами расчетов по каждой теме. Решения задач снабжены подробными комментариями и пояснениями. Учебник содержит тесты для самоконтроля и практические задания по расчету режима, которые позволяют системно объединить отдельные разрозненные знания и умения.

Для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по всем формам обучения, а также может быть полезным инженерно-техническим работникам.

УДК 621.311

ББК 31.2

ISBN 978-5-7046-3176-7

ISBN 978-5-7046-3177-4 (Т. 1)

© Г.В. Шведов, 2025

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	7
ВВЕДЕНИЕ. ПОНЯТИЕ РЕЖИМА.....	8
1. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	11
1.1. Схема замещения линий электропередачи.....	11
1.2. Схема замещения трансформаторов.....	22
1.3. Моделирование электрических нагрузок.....	28
Примеры решения задач.....	32
2. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	43
2.1. Построение векторной диаграммы.....	43
2.2. Зависимость напряжений по концам линии электропередачи от передаваемой мощности.....	48
2.3. Анализ векторной диаграммы.....	52
2.4. Особенности режима холостого хода линии.....	55
Примеры решения задач.....	56
3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЕЙШИХ РАЗОМКНУТЫХ СЕТЕЙ.....	58
3.1. Приведенная и расчетная нагрузка.....	58
3.2. Постановка задачи расчета режима.....	61
3.3. Алгоритм расчета режима элементарного участка электрической сети.....	64
3.4. Расчет режимов разомкнутых электрических сетей произвольной конфигурации.....	71
Примеры решения задач.....	72
4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ...	81
4.1. Вывод расчетных формул.....	82
4.2. Алгоритм расчета режима кольцевых сетей.....	87
4.3. Особенности расчета режимов замкнутых сетей с двухсторонним питанием.....	93
4.4. Особенности послеаварийных режимов кольцевых сетей.....	95
Примеры решения задач.....	95

5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ВАРИАЦИЯХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	109
5.1. Совместный расчет режимов сетей нескольких номинальных напряжений.....	109
5.2. Расчет режимов при задании нагрузок статическими характеристиками нагрузки.....	111
5.3. Особенности расчета режимов электрических сетей номинальным напряжением до 20 кВ.....	114
5.4. Расчет режимов электрических сетей с двумя источниками питания.....	116
5.5. Основы расчета режимов электрических сетей произвольной конфигурации.....	126
Примеры решения задач.....	132
6. КОМПЛЕКСНЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.....	154
6.1. Постановка задачи.....	154
6.2. Расчет параметров схем замещения линий.....	156
6.3. Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов.....	158
6.4. Составление схемы замещения сети.....	163
6.5. Расчет потокораспределения в ветвях и напряжений в узлах сети в нормальном режиме.....	166
6.6. Расчет потокораспределения в ветвях и напряжений в узлах сети в послеаварийном режиме.....	178
6.7. Варианты исходных данных для самостоятельного решения задачи.....	187
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ.....	191
7.1. Задачи.....	191
7.2. Тесты.....	202
ПРИЛОЖЕНИЕ. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ.....	248
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	257

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном издании материал структурирован и изложен в виде, удобном для восприятия современным студентом. Приведено много поясняющих иллюстраций. Содержание некоторых разделов представлено в другом ключе в сравнении с существующими изданиями (например, расчет режимов сетей с двумя источниками питания дан не через большой математический аппарат круговых диаграмм, а опираясь на знания и умения из теоретических основ электротехники). Текст теоретической части сокращен до минимума (учитывая, что многостраничное издание современный студент читать не будет).

Теоретическая часть гармонично дополнена примерами расчетов по каждой теме, позволяющими проиллюстрировать теоретические сведения. Решения задач снабжены подробными комментариями и пояснениями. В тексте имеются комментарии «Обратите внимание:», которые акцентируют внимание на ключевых моментах, что способствует полноценному формированию умений решения практических задач.

Приведены тесты для самоконтроля и практические задания по расчету режима, позволяющие системно объединить отдельные разрозненные знания и умения.

Таким образом, отличительная черта настоящего издания:

- максимальная краткость;
- анализ и трактовка всего теоретического материала, чтобы донести до читателя не только информацию «делай так», но и почему надо «так делать», как будут меняться параметры при изменении исходных условий;
- поясняющие иллюстрации к теоретической текстовой информации;
- наличие практических примеров;
- блок тестовых заданий и практических кейсов для самоконтроля и закрепления приобретенных знаний и умений.

В данном учебнике в качестве основного объекта рассматриваются электрические сети напряжением 110–220 кВ, выполненные воздушными линиями. Для других классов напряжения (35 кВ и меньше) и кабельных линий приводятся сопоставительные сведения в сравнении с рассматриваемым основным объектом. Расчет режимов электрических сетей свыше 220 кВ не рассматривается, поскольку является предметом изучения узкоспециализированных дисциплин и не требуется для освоения выпускниками большинства профилей направления «Электроэнергетика и электротехника».

ВВЕДЕНИЕ. ПОНЯТИЕ РЕЖИМА

Режимом называется состояние электроэнергетической системы в данный момент времени или в некотором интервале времени, при котором известны или рассчитаны параметры режима: напряжения в узлах и мощности (токи) в ветвях. Режим определяется составом включенных элементов электроэнергетической системы и величиной электрической нагрузки потребителей.

Режимы электроэнергетической системы разделяют на две большие группы: установившиеся и переходные.

Установившийся режим – это такой режим, при котором его параметры могут приниматься неизменными в течение некоторого интервала времени.

Переходный режим – это такой режим, при котором скорости изменения параметров режима настолько велики, что должны учитываться при расчете параметров режима. Переходные режимы – это различные аварийные режимы, наиболее ярким примером которых является режим короткого замыкания.

В данном курсе рассматриваются только установившиеся режимы. Поскольку режим, в том числе, определяется и нагрузкой потребителей электроэнергии, которая изменяется в течение суток, недели и года в соответствии с их потребностью и фактически

может быть принята неизменной только на небольшом интервале времени, то различных установившихся режимов электроэнергетической системы может выделено бесконечно много. Поэтому расчет и анализ установившихся режимов выполняют не для всевозможных режимов, а только «крайних» режимов:

- нормальный режим наибольших нагрузок, соответствующий максимальной нагрузке электроэнергетической системы (абсолютный годовой максимум нагрузки) и загрузке ее элементов;

- нормальный режим наименьших нагрузок, соответствующий минимальной нагрузке электроэнергетической системы (абсолютный годовой минимум нагрузки) и загрузке ее элементов;

- послеаварийные режимы, возникающие после локализации возможных расчетных аварийных режимов. Отличие послеаварийных режимов от нормальных заключается в отключении части элементов электроэнергетической системы и увеличении загрузки оставшихся в работе элементов. Для рассмотрения наиболее тяжелых случаев послеаварийные режимы всегда рассматриваются для условия максимальной нагрузки потребителей.

Расчеты установившихся режимов осуществляют как на этапе проектирования электрических сетей, так и на этапе последующей эксплуатации. По значениям рассчитанных параметров режима (напряжений в узлах и мощностей в ветвях) определяют:

- загрузку элементов сети для оценки соответствия пропускной способности сети прогнозируемым нагрузкам потребителей. В случае выявления недопустимой перегрузки элементов сети по результатам расчета режима предпринимают меры по ее недопущению;

- сечения проводов воздушных линий электропередачи, жил кабельных линий, мощностей трансформаторов понижающих подстанций;

- параметры коммутационных и защищающих аппаратов;

- потери активной и реактивной мощности для оценки выполнения балансов мощностей;

– соответствие уровней напряжения в узлах сети требованиям качества электроэнергии и при необходимости разрабатывают мероприятия по введению и поддержанию напряжений в узлах в допустимых пределах;

– потери электроэнергии для оценки экономической эффективности функционирования электрической сети и при необходимости внедряют мероприятия по снижению потерь электроэнергии;

– параметры уставок релейной защиты и т.д.

Схема замещения электрической сети является аналогом электрической цепи, поэтому в основе расчета режимов электрической сети лежат законы Кирхгофа и Ома и методы расчета электрических цепей. Но, учитывая разнообразие схем сетей и особенность задания исходных данных, необходимо адаптировать применение этих законов и методов к решению задач расчета установившихся режимов электрических сетей.

1. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Прежде чем приступать к расчетам режимов, необходимо составить математическую модель электрической сети – ее схему замещения. Схема замещения электрической сети (цепи) представляет собой графическое изображение, показывающее последовательность соединения ее участков. Она составляется с использованием схем замещения её отдельных элементов – линий электропередачи, трансформаторов (автотрансформаторов) понижающих подстанций и другого электрооборудования в случае его установки на понижающих подстанциях – и формируется в результате объединения схем замещения отдельных элементов в соответствии с последовательностью их соединения в рассчитываемой электрической сети.

1.1. Схема замещения линий электропередачи

Линия электропередачи, в отличие, например, от трансформатора, является элементом электрической сети с равномерно распределенными параметрами по ее длине. Учет распределенности параметров значительно усложняет задачу расчета режима. Для линий сравнительно небольшой длины (до 250–300 км), что характерно для сетей номинальным напряжением до 220 кВ включительно, волновыми свойствами линии можно пренебречь, что позволяет не учитывать распределенность ее параметров при расчете установившихся режимов. Поэтому в практических расчетах режимов электрических сетей номинальным напряжением до 220 кВ включительно линии электропередачи считают элементами со сосредоточенными (в одном месте) параметрами, например, как и трансформаторы. Расчет режимов электрических сетей номинальным напряжением 330 кВ и выше при длинах линий превышающих 250–300 км производят, учитывая распределенность параметров, но рассмотрение сетей таких классов напряжения выходит за рамки данного курса.

Линии электропередачи принято моделировать Π -образной схемой замещения (рис. 1.1). Т-образные схемы замещения не нашли широкого применения для моделирования линий электропередачи. Поскольку расчет режимов реальных энергосистем базируется на узловых уравнениях, то применение Π -образных схем позволяет сократить количество узлов в 1,5 раза в сравнении с применением Т-образных схем (в Π -образной схеме на один узел меньше, чем в Т-образной).

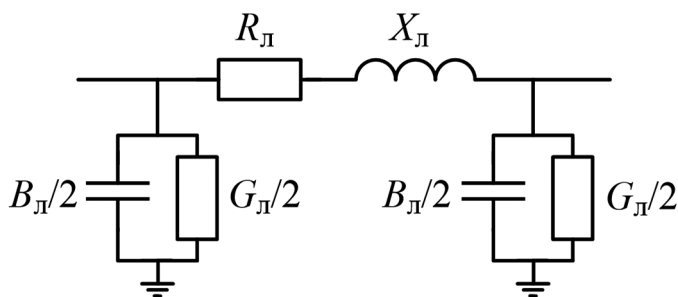


Рис. 1.1. Общая Π -образная схема замещения линии электропередачи

Π -образная схема замещения трехфазной линии электропередачи включает следующие параметры:

- $R_{\text{л}}$ [Ом] – активное сопротивление проводов линии – это активное сопротивление проводника протекающему по нему току. Оно обуславливает нагрев проводов (потери активной мощности нагрев, так называемые тепловые потери);
- $X_{\text{л}}$ [Ом] – индуктивное сопротивление линии – обусловлено переменным магнитным полем провода при протекании по нему переменного тока. Отражает самоиндукцию проводов и взаимоиндукцию проводов соседних фаз;
- $G_{\text{л}}$ [См] – активная проводимость линии. Отражает потери активной мощности на корону (только для воздушных линий электропередачи) и на токи утечки через изоляцию (как для воздушных так и для кабельных линий электропередачи);

• $B_{\text{л}}$ [См] – емкостная проводимость линии – обусловлена переменным электростатическим полем провода, находящимся под переменным напряжением. Отражает емкость проводов относительно земли и между проводами соседних фаз.

Сопротивления относят к продольным параметрам схемы замещения линии, проводимости – к поперечным.

Параметры схемы замещения линии электропередачи рассчитывают через удельные (погонные) параметры, соответственно R_0, X_0, G_0, B_0 .

Удельное активное сопротивление провода R_0 [Ом/км] зависит от материала провода (его электропроводности) и его поперечного сечения и определяется либо по справочным данным, либо по выражению:

$$R_0 = \frac{\rho}{F},$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода, Ом·мм²/км; F – сечение провода, мм².

На удельное активное сопротивление оказывает влияние температура провода. Однако температура провода постоянно изменяется под действием протекающего тока и метеорологических факторов и в общем случае неодинакова по длине провода, что приводит к невозможности учета температуры провода для каждого конкретного случая. При расчетах установившихся режимов электрических сетей обычно принимают, что температура провода соответствует среднеэксплуатационной, принимаем равной +20°C. Не учет фактической температуры проводов в большинстве задач расчетов установившихся режимов приводит к погрешности не превышающей точности задания исходных данных.

Для наиболее распространенных сталеалюминиевых проводов активным сопротивлением стального сердечника пренебрегают, считая, что за счет поверхностного эффекта на переменном токе и меньшего сопротивления алюминия в сравнении со сталью весь ток вытесняется в алюминиевую часть провода. Таким образом, сопротивление сталеалюминиевого провода на переменном токе определяется только сечением алюминиевой части провода.

Удельное индуктивное сопротивление линии X_0 [Ом/км] с нерасщепленной фазой зависит от расстояния между проводами соседних фаз и радиуса провода и определяется либо по справочным данным, либо по выражению:

$$X_0 = 0,14451 \lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157,$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус провода; $D_{\text{сг}}$ – среднеегеометрическое расстояние между проводами фаз линии, которое для трехфазной линии определяется по выражению:

$$D_{\text{сг}} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}},$$

где D_{AB} , D_{BC} , D_{AC} – расстояния между проводами фаз соответственно A и B , B и C , A и C .

Потери активной мощности в изоляции линий электропередачи существенно меньше потерь на нагрев проводов и не оказывают влияние на расчет параметров режимов электрических сетей. Поэтому при определении **удельной активной проводимости** линии G_0 [См/км] потерями активной мощности в изоляции пренебрегают, учитывая только потери на корону:

$$G_0 = \frac{\Delta P_{\text{кор } 0}}{U_{\text{ном}}^2},$$

где $\Delta P_{\text{кор } 0}$ – удельные среднегодовые потери активной мощности на корону, МВт/км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение воздушной линии, кВ.

Удельная емкостная проводимость линии B_0 [См/км] с нерасщепленной фазой также как удельное индуктивное сопротивление зависит от расстояния между проводами соседних фаз и радиуса провода и определяется либо по справочным данным, либо по выражению:

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{пр}}}}.$$

При сооружении воздушных линий на двухцепных опорах провода одной трехфазной цепи будут оказывать влияние на индуктивное сопротивление и емкостную проводимость второй цепи. Однако влияние второй цепи на удельное индуктивное сопротивление и удельную емкостную проводимость не превышает 5–6%. Поэтому в расчетах установившихся режимов влиянием второй цепи пренебрегают, представляя линию на двухцепных опорах как две параллельно идущие линии на одноцепных опорах.

Для линии электропередачи длиной L с числом трехфазных цепей $n_{\text{ц}}$ параметры схемы замещения через удельные параметры будут определяться по следующим выражениям:

$$R_{\text{л}} = \frac{R_0 L}{n_{\text{ц}}}; \quad X_{\text{л}} = \frac{X_0 L}{n_{\text{ц}}}; \quad B_{\text{л}} = n_{\text{ц}} B_0 L; \quad G_{\text{л}} = n_{\text{ц}} G_0 L.$$

Поскольку к режимным параметрам электрических сетей относятся напряжения и мощности, то для удобства расчетов режимов «вручную» принято активную проводимость заменять отбором активной мощности, равным потерям на корону, а емкостную проводимость – генерацией зарядной мощности линии $Q_{\text{сл}}$ [Мвар], которую вычисляют либо через емкостную проводимость линии и номинальное напряжение линии, либо через удельную зарядную мощность линии $Q_{\text{с0}}$ [Мвар/км]:

$$Q_{\text{сл}} = U_{\text{ном}}^2 B_{\text{л}} = n_{\text{ц}} Q_{\text{с0}} L.$$

В свою очередь:

$$Q_{\text{с0}} = U_{\text{ном}}^2 B_0.$$

При применении П-образной схемы замещения (рис. 1.1) параметры поперечных ветвей принято «разделять на две половинки», поэтому обычно для удобства последующего расчета режима сразу рассчитывают значения половинок зарядных мощностей линии:

$$\frac{Q_{\text{сл}}}{2} = \frac{U_{\text{ном}}^2 B_{\text{л}}}{2} = \frac{n_{\text{ц}} Q_{\text{с0}} L}{2}.$$

Анализ удельных параметров. Удельное активное сопротивление провода обратно пропорционально сечению провода (рис. 1.2). Принимая удельное сопротивление алюминия примерно равным $30 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$, получим, что для провода с сечением алюминиевой части 70 мм^2 удельное активное сопротивление составит около $0,44 \text{ Ом/км}$; для провода 240 мм^2 – примерно $0,12 \text{ Ом/км}$. Обобщив, получим, что удельное активное сопротивление проводов и кабелей, применяемых в электрических сетях варьируется от нескольких сотых долей Ом/км у самых больших сечений (500 мм^2) до единиц Ом/км у самых маленьких сечений (16 мм^2).

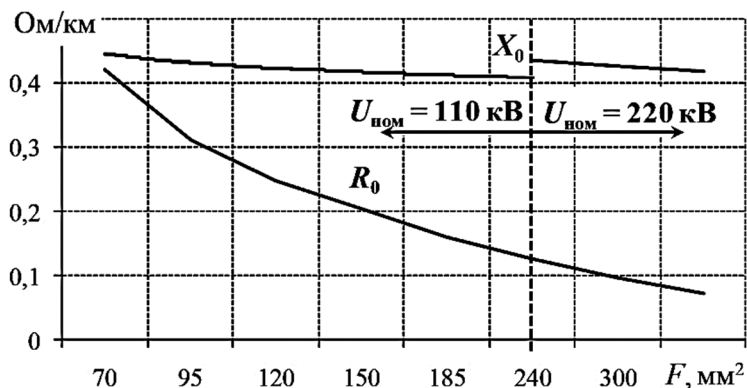


Рис. 1.2. Зависимость удельного активного R_0 и индуктивного X_0 сопротивления провода от сечения провода F для воздушных линий напряжением 110 и 220 кВ

Удельное индуктивное сопротивление линии определяется отношением среднегеометрического расстояния между проводами фаз линии и радиуса провода, который взаимосвязан с сечением провода. Но поскольку эти параметры находятся под знаком десятичного логарифма, то их изменение в небольшом диапазоне (в несколько раз) практически не сказывается на значении удельного индуктивного сопротивления (напомним из курса математики, что изменение аргумента десятичного логарифма в десять раз приводит к изменению логарифма в два раза). Для воздушных

линий напряжением 35–220 кВ удельное индуктивное сопротивление находится в диапазоне 0,4–0,44 Ом/км; для воздушных линий напряжением 10 кВ за счет существенного уменьшения среднегеометрического расстояния между фазами снижается до 0,36 Ом/км (среднегеометрические расстояния между фазами соответственно для напряжения 10 кВ – 1,1 м, 35 кВ – 3,5 м, 110 кВ – 5,0 м, 220 кВ – 8,0 м). Зависимость удельного индуктивного сопротивления от сечения очень пологая в сравнении с зависимостью удельного активного сопротивления (см. рис. 1.2).

У кабелей расстояние между фазами существенно меньше чем у воздушных линий – примерно на 2 порядка. Поэтому удельное индуктивное сопротивление кабелей в несколько раз меньше, чем у воздушных линий.

Поскольку в выражении удельной емкостной проводимости десятичный логарифм отношения среднегеометрического расстояния между проводами фаз линии и радиуса провода фигурирует в знаменателе, то соотношение удельной емкостной проводимости у кабелей и воздушных линий будет противоположным соотношению удельных индуктивных сопротивлений. Изменение сечения провода также практически не оказывает влияние на значение удельной емкостной проводимости, которая незначительно увеличивается с ростом сечения провода. Значение удельной зарядной мощности в основном определяется номинальным напряжением линии и составляет для воздушных линий напряжением 220 кВ около 0,14 Мвар/км, 110 кВ–0,036 Мвар/км, 35 кВ–0,0035 Мвар/км.

Преобразование (упрощение) общей схемы замещения линии электропередачи. Потери мощности на корону становятся заметной величиной, начиная с номинального напряжения воздушной линии 110 кВ. Но при этом в электрических сетях напряжением 110–220 кВ потери на корону все равно существенно меньше потерь на нагрев проводов, а активная проводимость на два порядка меньше емкостной. Это позволяет упростить схемы замещения воздушных линий напряжением 110–220 кВ – пренебречь активной проводимостью (рис. 1.3).

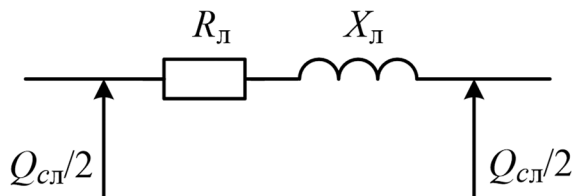


Рис. 1.3. Схема замещения воздушных линий напряжением 110–220 кВ

Зарядная мощность линий прямо пропорциональна квадрату номинального напряжения. При номинальном напряжении воздушной линии 35 кВ ее значение становится на порядок меньше потерь реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии, что позволяет полностью пренебречь поперечными проводимостями в схемах замещения воздушных линий напряжением 35 кВ и ниже (рис. 1.4).

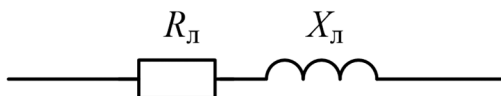


Рис. 1.4. Схема замещения воздушных линий напряжением 35 кВ и ниже

Аналогичная схема замещения применяется и для кабельных линий напряжением до 20 кВ включительно. За счет больших значений удельных емкостных проводимостей у кабелей в сравнении с воздушными линиями, в схемах замещения кабельных линий емкостную проводимость необходимо учитывать, начиная с напряжения 35 кВ.

Для кабелей небольших сечений (до 95–120 мм²) активное сопротивление в несколько раз больше индуктивного, что позволяет пренебречь последним и упростить схему замещения до вида, приведенного на рис. 1.5.

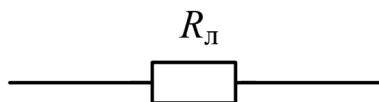


Рис. 1.5. Схема замещения кабельных линий сечением до 95–120 мм²

Расщепление проводов фазы воздушной линии. Явление короны обусловлено ионизацией воздуха вблизи поверхности проводов воздушной линии. Оно возникает при превышении напряженности электрического поля на поверхности провода некоторого критического значения. Поскольку напряженность электрического поля на поверхности провода зависит от радиуса провода, то для ограничения потерь мощности на корону ограничивают минимальное сечение проводов:

- для напряжения 110 кВ – АС 70/11;
 - для напряжения 220 кВ – АС 240/32;
 - для напряжения 330 кВ – АС 600/72;
- и так далее.

Массовое применение проводов более чем АС 500/64 на воздушных линиях экономически не целесообразно (сложности в транспортировке и монтаже, большая масса и механические нагрузки, большая жесткость). Поэтому на воздушных линиях, начиная с номинального напряжения 330 кВ, применяется расщепление фаз на несколько проводов меньшего сечения:

- при напряжении 330 кВ – на $N = 2$ провода;
- при напряжении 500 кВ – на $N = 3–4$ провода;
- при напряжении 750 кВ – на $N = 4–5$ провода.

Например, для линии напряжением 330 кВ при расщеплении фазы на 2 провода минимальное сечение проводов уменьшается до АС 240/32.

Провода расщепленной фазы расположены по вершинам правильного многоугольника с расстоянием между соседними проводами, называемом шагом расщепления a , равным 40 см (рис. 1.6).

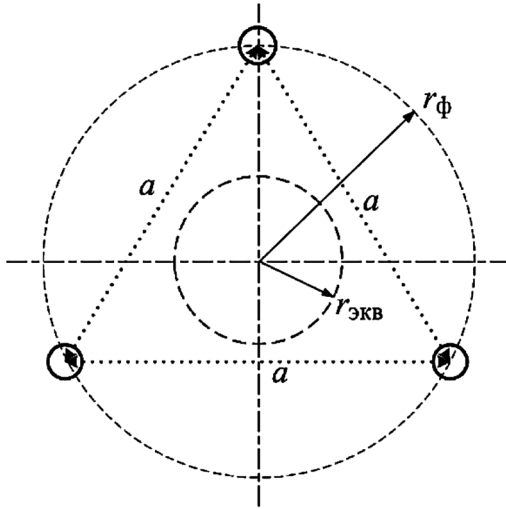


Рис. 1.6. Расщепление фазы воздушной линии на три провода

Учет расщепления фазы при определении удельных параметров воздушных линий осуществляется заменой расщепленной фазы на единичный провод с эквивалентным радиусом, равным:

$$r_{\text{экв}} = \sqrt[N]{r_{\text{пр}} \cdot N \cdot r_{\text{ф}}^{(N-1)}},$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус провода; N – число проводов в расщепленной фазе; $r_{\text{ф}}$ – радиус, описанный вокруг правильного многоугольника окружности, определяемый в свою очередь по выражению (из курса геометрии):

$$r_{\text{ф}} = \frac{a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}.$$

Тогда удельные параметры воздушных линий с расщепленной фазой будут определяться по выражениям:

$$R_{0\phi} = \frac{R_{0\text{пр}}}{N}; \quad X_{0\phi} = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{экв}}} + \frac{0,0157}{N}; \quad B_{0\phi} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{экв}}}}.$$

Расщепление фазы провода приводит к уменьшению индуктивного сопротивления провода и увеличению емкостной проводимости (и как следствие – к увеличению зарядной мощности). Активное сопротивление расщепленной фазы определяется как параллельное соединение проводов и при расщеплении фазы не изменяется. Например, единичный провод в фазе сечением 600 мм^2 имеет такое же активное сопротивление как и расщепленная фаза на 2 провода, каждый из которых сечением 300 мм^2 , т.е. активное сопротивление фазы определяется только суммарным сечением проводов фазы.

Транспозиция проводов фаз. При расположении проводов фаз на опоре по вершинам равностороннего треугольника (рис. 1.7, *а*) индуктивные сопротивления и емкостные проводимости фаз равны. При расположении проводов фаз, например, в горизонтальной плоскости (рис. 1.7, *б*) индуктивное сопротивление средней фазы будет меньше, чем у крайних фаз; емкостная проводимость средней фазы, будет наоборот больше чем у крайних фаз.

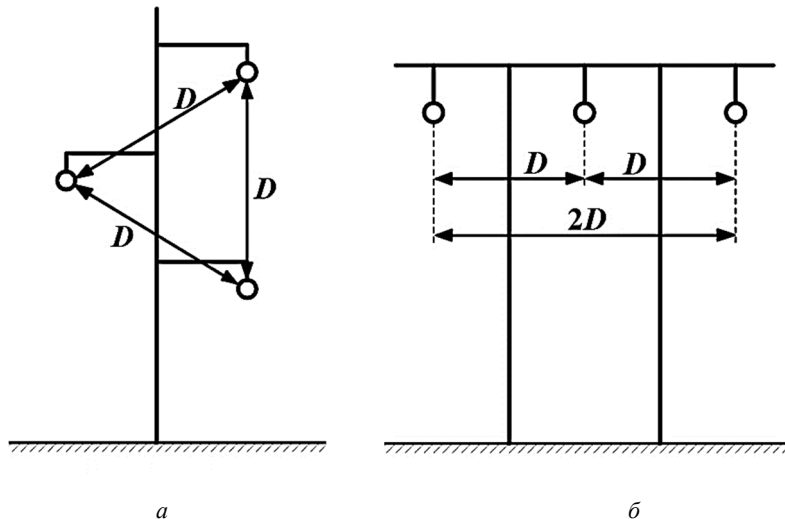


Рис. 1.7. Расположение проводов фаз на опоре:
а – по вершинам равностороннего треугольника;
б – в горизонтальной плоскости

Неравенство сопротивлений и проводимостей фаз линий электропередачи будет вызывать несимметрию напряжений в узлах электрической сети. Чем больше будет длина линии (больше будут значения сопротивлений и проводимостей), тем больше будет влиять несимметрия по фазам параметров схемы замещения линии на несимметрию параметров режима. Для устранения данного эффекта для воздушных линий длиной, как правило, более 70 км применяют транспозицию проводов фаз, заключающуюся в поочередном изменении местоположения проводов (рис. 1.8). За полный цикл транспозиции провод каждой фазы занимает всевозможные позиции на одинаковых участках длины линий.

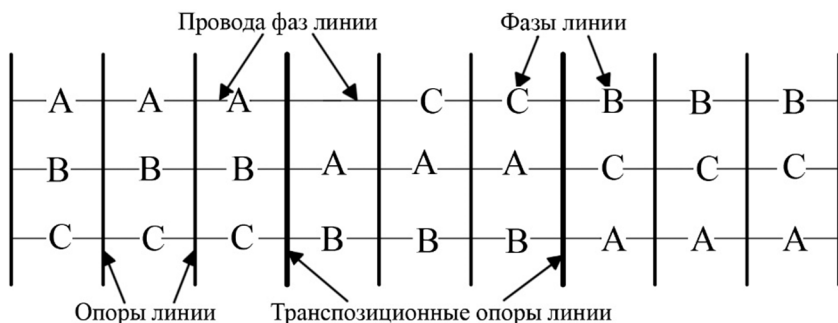


Рис. 1.8. Схема полного цикла транспозиции проводов фаз при расположении проводов фаз в горизонтальной плоскости (вид сверху)

1.2. Схема замещения трансформаторов

Двухобмоточный трансформатор (рис. 1.9, а) для расчетов установившихся режимов представляют Г-образной схемой замещения (рис. 1.9, б). Наличие расщепленной обмотки низшего напряжения при расчете установившихся режимов не влияет на схему замещения трансформатора. Поскольку расщепление обмотки низшего напряжения выполняют для ограничения токов короткого замыкания, то при расчете переходных процессов (токов короткого замыкания) схему замещения двухобмоточного трансформатора представляют в виде трехлучевой звезды как для трехобмоточных трансформаторов (см. далее).

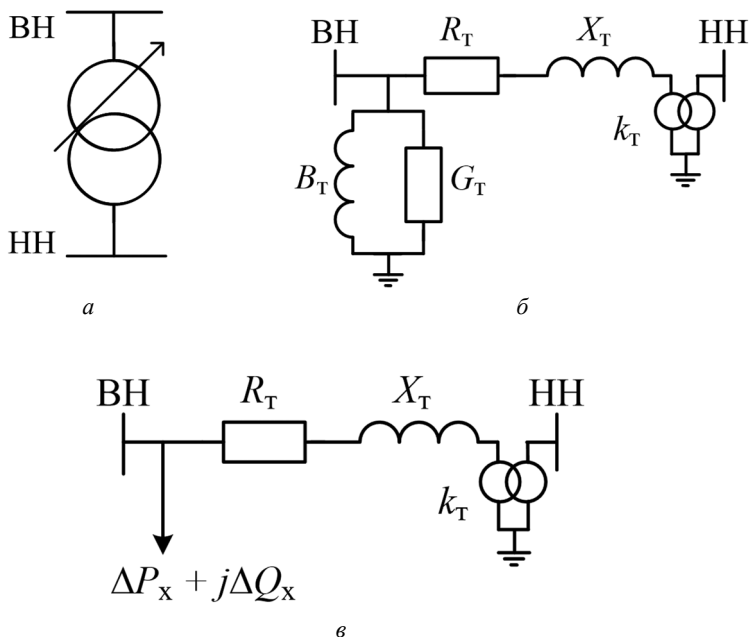


Рис. 1.9. Условное обозначение (а), полная (б) и упрощенная (в) схема замещения двухобмоточного трансформатора

Полная Г-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора состоит из продольной ветви – R_T и X_T [Ом] – активного и реактивного сопротивления обмоток трансформатора и поперечной ветви (ветви намагничивания) – G_T и B_T [См] – активной и реактивной проводимости трансформатора. Активное сопротивление обуславливает потери активной мощности на нагрев обмоток. Индуктивное сопротивление обусловлено потоком рассеяния в обмотках трансформатора. Активная проводимость определяется потерями активной мощности в стали трансформатора на гистерезис и вихревые токи. Индуктивная проводимость отражает намагничивание стали. В схему замещения включен идеальный трансформатор, не имеющий сопротивлений и магнитных потоков рассеяния, отражающий коэффициент трансформации трансформатора (k_T).

Также как и в схемах замещения линий электропередачи для ручного расчета режимов электрических сетей напряжением до 220 кВ включительно принято поперечную ветвь схемы замещения заменять постоянным отбором мощности – активными ΔP_x [МВт] и реактивными ΔQ_x [Мвар] потерями мощности холостого хода, переходя к упрощенной схеме замещения (рис. 1.9, в). Отбор мощности осуществляется от узла, к которому подключена обмотка высшего напряжения.

Для вычисления параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора используются следующие паспортные данные трансформатора:

- номинальная мощность $S_{\text{тном}}$, МВ·А;
- номинальное напряжение обмотки высшего напряжения $U_{\text{вн}}$, кВ;
- данные опыта короткого замыкания:
 - потери короткого замыкания ΔP_k , кВт;
 - относительное значение напряжения короткого замыкания u_k , %;
- данные опыта холостого хода:
 - потери холостого хода ΔP_x , кВт;
 - относительное значение тока холостого хода I_x , %.

Активное сопротивление, реактивное сопротивление, потери активной мощности холостого хода, потери реактивной мощности холостого хода для n_t параллельно работающих трансформаторов соответственно определяются по выражениям:

$$R_t = \frac{1}{n_t} \frac{\Delta P_k U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}^2}; \quad X_t = \frac{1}{n_t} \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}};$$

$$\Delta P_x = n_t \Delta P_x; \quad \Delta Q_x = n_t \frac{I_x}{100} S_{\text{тном}}.$$

Поскольку идеальный трансформатор стоит в конце схемы замещения (за сопротивлениями обмоток), то значения активного и реактивного сопротивления приведено к напряжению обмотки высшего напряжения.

Схема замещения *трехобмоточного трансформатора* (рис. 1.10, а) и *автотрансформатора* (рис. 1.10, б) представляет собой трехлучевую звезду (рис. 1.10, в, на котором сразу приведена упрощенная схема замещения с замененной поперечной ветвью намагничивания потерями мощности холостого хода). Сопротивления лучей высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжения, соответственно: $R_{ТВ}$ и $X_{ТВ}$, $R_{ТС}$ и $X_{ТС}$, $R_{ТН}$ и $X_{ТН}$ не являются физическими сопротивлениями обмоток высшего, среднего и низшего напряжений, а представляют чисто математические величины.

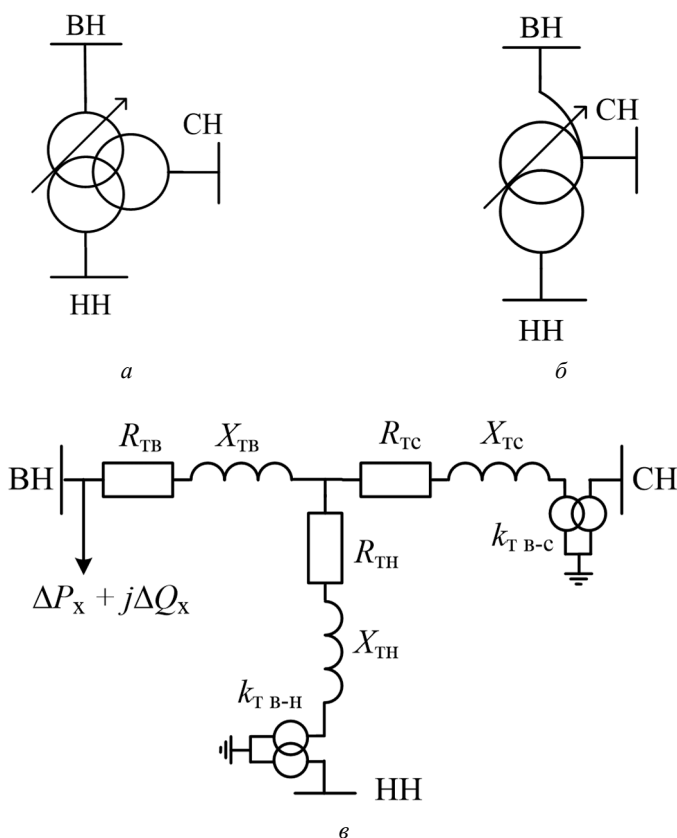


Рис. 1.10. Условное обозначение трехобмоточного трансформатора (а), автотрансформатора (б) и их упрощенная схема замещения (в)

Состав паспортных данных современных трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов для расчета параметров схемы замещения отличается от данных двухобмоточных тем, что вместо одного значения u_k приведены три ($u_{k\text{ в-с}}, u_{k\text{ в-н}}, u_{k\text{ с-н}}$), каждое из которых соответствует одному из трех опытов короткого замыкания с участием соответствующих пар обмоток, отмеченных в индексах; вместо значения ΔP_k приведено значение $\Delta P_{k\text{ в-с}}$; дополнительно приведена информация о соотношении номинальных мощностей обмоток. В современных трехобмоточных трансформаторах все обмотки рассчитаны на номинальную мощность трансформатора (соотношение номинальных мощностей обмоток 100%/100%/100%). У автотрансформаторов обмотка низшего напряжения всегда рассчитана на мощность меньшую номинальной (например, для автотрансформаторов 220/110 кВ номинальная мощность обмотки низшего напряжения составляет 40 или 50% номинальной мощности автотрансформатора; это соотношение обозначают через α).

Для вычисления индуктивных сопротивлений лучей схемы замещения необходимо предварительно определить напряжения короткого замыкания, относящиеся к каждому лучу схемы замещения через напряжения короткого замыкания пар обмоток, приведенных в паспортных данных:

$$u_{k\text{ в}} = 0,5(u_{k\text{ в-с}} + u_{k\text{ в-н}} - u_{k\text{ с-н}});$$

$$u_{k\text{ с}} = 0,5(u_{k\text{ в-с}} + u_{k\text{ с-н}} - u_{k\text{ в-н}});$$

$$u_{k\text{ н}} = 0,5(u_{k\text{ в-н}} + u_{k\text{ с-н}} - u_{k\text{ в-с}}).$$

В редких исключениях могут быть заданы все три значения потерь короткого замыкания. Тогда, как и напряжения короткого замыкания, необходимо определить потери короткого замыкания, относящиеся к каждому лучу схемы замещения.

Активное сопротивление соответственно лучей ВН, СН и НН для n_T параллельно работающих трехобмоточных трансформаторов рассчитывается (при соотношении номинальных мощностей обмоток 100%/100%/100%):

$$R_{TB} = R_{TC} = R_{TH} = \frac{1}{n_T} \frac{0,5 \Delta P_{KB-C} U_{BH}^2}{S_{THOM}^2}.$$

Активное сопротивление соответственно лучей ВН, СН и НН для n_T параллельно работающих автотрансформаторов рассчитывается (соотношение номинальных мощностей обмоток 100%/100%/ α %):

$$R_{TB} = R_{TC} = \frac{1}{n_T} \frac{0,5 \Delta P_{KB-C} U_{BH}^2}{S_{THOM}^2};$$

$$R_{TH} = \frac{R_{TB.ЭКВ}}{\alpha}.$$

Индуктивное сопротивление соответственно лучей ВН, СН и НН для n_T параллельно работающих трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов рассчитывается:

$$X_{TB} = \frac{1}{n_T} \frac{u_{KB}}{100} \frac{U_{BH}^2}{S_{THOM}};$$

$$X_{TC} = \frac{1}{n_T} \frac{u_{KC}}{100} \frac{U_{BH}^2}{S_{THOM}};$$

$$X_{TH} = \frac{1}{n_T} \frac{u_{KH}}{100} \frac{U_{BH}^2}{S_{THOM}}.$$

Индуктивное сопротивление луча среднего напряжения в результате расчета получается равным нулю или небольшому отрицательному значению. В последнем случае оно также приравнивается нулю.

Поскольку идеальные трансформаторы стоят в конце схемы замещения (за сопротивлениями лучей), то значения активного и реактивного сопротивления лучей ВН, СН и НН приведено к напряжению обмотки высшего напряжения. Именно поэтому во всех формулах для сопротивлений всех лучей (и особенно лучей СН и НН) в числителе стоит номинальное напряжение обмотки высшего напряжения.

Потери активной мощности холостого хода и потери реактивной мощности холостого хода для n_t параллельно работающих трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов определяются по выражениям аналогичным для двухобмоточных трансформаторов:

$$\Delta P_x = n_t \Delta P_x ;$$

$$\Delta Q_x = n_t \frac{I_x}{100} S_{\text{тном}} .$$

1.3. Моделирование электрических нагрузок

Потребляемая электроприемником мощность изменяется при изменении уровня питающего напряжения на его зажимах и частоты. Степень этой зависимости различна для разных электроприемников (осветительной нагрузки, асинхронных двигателей, синхронных двигателей, преобразовательной нагрузки, электропечей и т.д.). Поскольку от узла электрической сети (а особенно напряжением свыше 1 кВ) получает питание не отдельный электроприемник, а их совокупность, то интерес представляют обобщенные зависимости потребляемой активной и реактивной мощности суммарной нагрузки, состоящей из большой совокупности разнообразных электроприемников, от напряжения и частоты. Такие зависимости называют обобщенными статическими характеристиками нагрузками, и представляют в виде полиномов второй степени:

$$P(U) = P_{\text{ном}} \left[a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] \left(1 + c \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}} - 1 \right) \right);$$

$$Q(U) = Q_{\text{ном}} \left[b_0 + b_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + b_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] \left(1 + d \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}} - 1 \right) \right),$$

где $P_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$ – соответственно потребляемая активная и реактивная мощность при номинальном напряжении $U = U_{\text{ном}}$ и номинальной частоте $f = f_{\text{ном}}$; a_i , b_i , c , d – некоторые коэффициенты, определяемые характеристиками отдельных электроприемников и их мощностью в суммарной нагрузке.

Сумма коэффициентов a_i и b_i у любых статических характеристик нагрузки должна равняться единице: $a_0 + a_1 + a_2 = 1$; $b_0 + b_1 + b_2 = 1$. В противном случае при номинальном напряжении фактически потребляемая мощность $P(U)$ и $Q(U)$ не будет соответственно равняться $P_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$.

Чаще всего статические характеристики нагрузки принято представлять не в абсолютных величинах, а в относительных:

$$P_{*}(U_{*}) = \left(a_0 + a_1 U_{*} + a_2 U_{*}^2 \right) \cdot \left(1 + c \left(f_{*} - 1 \right) \right);$$

$$Q_{*}(U_{*}) = \left(b_0 + b_1 U_{*} + b_2 U_{*}^2 \right) \cdot \left(1 + d \left(f_{*} - 1 \right) \right);$$

$$P_{*}(U_{*}) = \frac{P(U)}{P_{\text{ном}}}; \quad Q_{*}(U_{*}) = \frac{Q(U)}{Q_{\text{ном}}}; \quad U_{*} = \frac{U}{U_{\text{ном}}}; \quad f_{*} = \frac{f}{f_{\text{ном}}}.$$

Поскольку допустимые отклонения частоты от номинального значения в электроэнергетической системе достаточны малы, то значения выражений $c \cdot \left(f_{*} - 1 \right)$ и $d \cdot \left(f_{*} - 1 \right)$ близки к нулю, что позволяет в практических расчетах установившихся режимов не учитывать влияние изменения частоты на потребляемую нагрузкой активную и реактивную мощность.

Для шин низшего напряжения 6–20 кВ понижающих подстанций, от которых получает питание смешанная нагрузка (промышленные предприятия, городская застройка, электрофицированный транспорт) вводится понятие узла комплексной нагрузки, который характеризуется следующим среднестатистическим составом электроприемников по активной мощности:

- асинхронные двигатели небольшой мощности 35%;
- мощные асинхронные двигатели – 15%;
- синхронные двигатели – 9%;
- выпрямительная и преобразовательная нагрузка – 11%;
- освещение и бытовая нагрузка – 22%;
- потери мощности – 8%.

Для такого узла комплексной нагрузки статические характеристики нагрузки имеют вид:

$$P_{*}(U_{*}) = 0,1 + 0,9U_{*}; \quad Q_{*}(U_{*}) = 9,7 - 22,2U_{*} + 13,5U_{*}^2$$

и графически представлены на рис. 1.11 кривыми 1а и 1б.

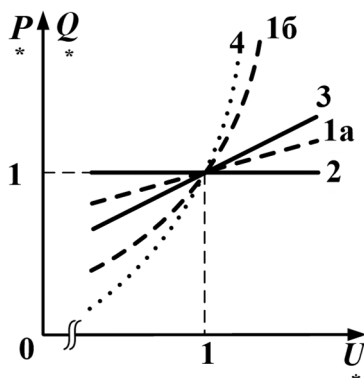


Рис. 1.11. Зависимость активной и реактивной мощности нагрузки от уровня питающего напряжения при различных способах представления нагрузки:

- 1а и 1б – обобщенными статическими характеристиками нагрузки;
- 2 – неизменной мощностью; 3 – неизменным полным током;
- 4 – неизменным активным и реактивным сопротивлениями

Моделирование нагрузок обобщенными статическими характеристиками нагрузки обеспечивает наиболее точный результат. Однако такое представление нагрузок в схемах замещения электрических сетей значительно усложнит расчет режимов, так как, во-первых, статические характеристики нагрузки являются нелинейной функцией потребляемой мощности от напряжения, а, во-вторых, для определения потребляемой мощности по статическим характеристикам нагрузки необходимо знать напряжение в узле нагрузки (в большинстве случаев задач расчета установившихся режимов фактические напряжения в узлах электрических сетей неизвестны).

С другой стороны, фактические напряжения в узлах электрических сетей в большинстве случаев отличаются от номинальных не более чем на 15%, а, следовательно, отличие потребляемой мощности от значений при номинальном напряжении будут не очень значительными. Этот факт позволяет широко использовать в расчетах установившихся режимов существенно более простой способ представления нагрузки в схемах замещения электрических сетей – неизменной (при изменении уровня напряжения в узле) активной и реактивной мощностью – прямая 2 на рис. 1.11.

Достаточно точно в области небольших отклонений напряжения в узлах нагрузки от номинального учесть зависимость изменения нагрузки от напряжения позволяет третий способ задания нагрузки – неизменным током (прямая 3 на рис. 1.11). Эта зависимость линейна, так как мощность прямолинейно зависит от напряжения и тока.

При больших отклонениях напряжения в узлах вместо представления нагрузки неизменным током целесообразно моделировать нагрузку неизменным сопротивлением (как последовательным соединением активного и индуктивного сопротивления, так и параллельным) – кривая 4 на рис. 1.11. Этот способ нашел широкое распространение при расчете переходных режимов и при моделировании установившихся режимов на физических моделях (например, на лабораторных стендах).

Схематически все четыре возможных способа представления нагрузок в схемах замещения электрических сетей представлены на рис. 1.12.

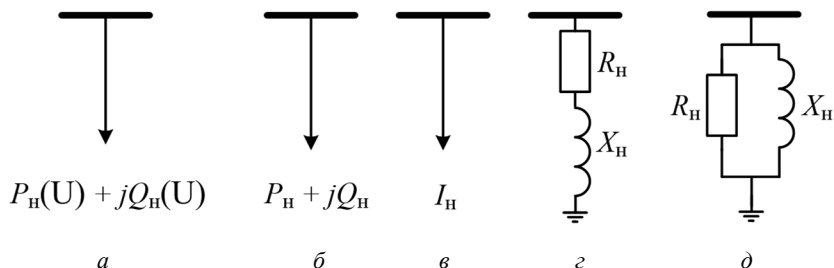


Рис. 1.12. Способы моделирования нагрузок при расчетах режимов:

a – обобщенными статическими характеристиками нагрузки;
б – неизменной мощностью; *в* – неизменным полным током;
г – неизменным активным и реактивным сопротивлениями, соединенными последовательно; *д* – неизменным активным и реактивным сопротивлениями, соединенными параллельно

В дальнейшем при решении задач расчета установившегося режима будет в основном применять второй способ задания нагрузки – неизменной мощностью, а в ряде случаев (наиболее точный способ) – обобщенными статическими характеристиками нагрузки.

Примеры решения задач

Задача 1.1

Вычислить параметры схемы замещения двухцепной ($n_{\text{ц}} = 2$) воздушной линии напряжением $U_{\text{ном}} = 110$ кВ длиной $L = 50$ км, выполненной проводами марки АС 240/32.

Решение. В расчетах электрических сетей номинального напряжения 110–220 кВ воздушные линии замещаются П-образной схемой замещения, показанной на рис. 1.13.

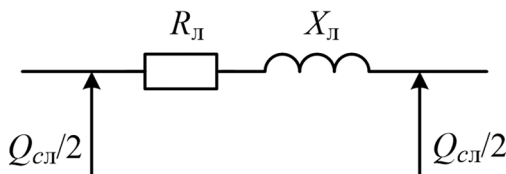


Рис. 1.13. Схема замещения воздушных линий 110–220 кВ

Параметры схемы замещения:

- $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление, Ом;
- $X_{\text{л}}$ – индуктивное сопротивление, Ом;
- $Q_{\text{сл}}$ – зарядная мощность, Мвар, определяемая емкостной проводимостью $B_{\text{л}}$, См.

Параметры схемы замещения, как правило, рассчитываются через удельные параметры. Удельное активное сопротивление определяется по справочным данным:

$$R_0 = 0,118 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

Для линий с нерасщепленной фазой удельное индуктивное сопротивление и удельная емкостная проводимость определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} X_0 &= 0,1445 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157 = \\ &= 0,1445 \lg \frac{5000 [\text{мм}]}{\frac{21,6}{2} [\text{мм}]} + 0,0157 = 0,401 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; \\ B_0 &= \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{5000 [\text{мм}]}{\frac{21,6}{2} [\text{мм}]} } = 2,844 \cdot 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}. \end{aligned}$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус провода; $D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линии.

Для линий 110 кВ $D_{\text{ср}} = 5$ м (см. справочные данные); диаметр провода марки АС 240/32 $d_{\text{пр}} = 21,6$ мм (см. справочные данные).

Обратите внимание: логарифм берется от безразмерной величины. Поэтому среднегеометрическое расстояние между фазами линии и радиус провода должны иметь одинаковую размерность, например, мм.

Удельная зарядная мощность линии:

$$Q_{c0} = U_{\text{ном}}^2 B_0 = 110^2 \cdot 2,844 \cdot 10^{-6} = 0,0344 \frac{\text{Мвар}}{\text{км}}.$$

Эквивалентное активное сопротивление двух цепей линии:

$$R_{\text{л}} = \frac{R_0 L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,118 \cdot 50}{2} = 2,95 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление двух цепей линии без учета их взаимного влияния:

$$X_{\text{л}} = \frac{X_0 L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,401 \cdot 50}{2} = 10,0 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная емкостная проводимость двух цепей линии:

$$B_{\text{л}} = B_0 L n_{\text{ц}} = 2,844 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 2 = 284,4 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Половина эквивалентной зарядной мощности двух цепей линии:

$$\frac{Q_{\text{сл}}}{2} = \frac{Q_{c0} L n_{\text{ц}}}{2} = \frac{0,0344 \cdot 50 \cdot 2}{2} = 1,72 \text{ Мвар}.$$

Обратите внимание: эквивалентные сопротивления обратно пропорциональны количеству параллельных цепей линии, а эквивалентные проводимости – прямо пропорциональны.

Задача 1.2

Вычислить удельные параметры схемы замещения воздушной линии напряжением $U_{\text{ном}} = 330$ кВ с фазой, расщепленной на два провода $N = 2$, и выполненной проводами марки АС 240/32. Принять шаг расщепления $a = 40$ см.

Решение. Для решения задачи потребуются следующие справочные данные:

– среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линии: для линий 330 кВ $D_{\text{ср}} = 11$ м (см. справочные данные);

– диаметр провода: для провода марки АС 240/32 $d_{\text{пр}} = 21,6$ мм (см. справочные данные);

– удельное активное сопротивление: для провода марки АС 240/32 $R_0 = 0,118 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ (см. справочные данные).

Учет расщепления при определении удельных параметров воздушных линий осуществляется заменой расщепленной фазы на единичный провод с эквивалентным радиусом. Для его вычисления сначала определим радиус, описанный вокруг правильного многоугольника (который образуют фазы расщепленной фазы) окружности (из курса геометрии):

$$r_{\phi} = \frac{a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} = \frac{400}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 200 \text{ мм}.$$

где a – шаг расщепления.

Эквивалентный радиус расщепленной фазы:

$$r_{\text{экв}} = \sqrt[N]{r_{\text{пр}} \cdot N \cdot r_{\phi}^{(N-1)}} = \sqrt[2]{21,6/2 \cdot 2 \cdot 200} = 65,7 \text{ мм};$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус провода; N – число проводов в расщепленной фазе.

Тогда удельные параметры воздушных линий с расщепленной фазой будут определяться по выражениям:

$$R_{0\phi} = \frac{R_{0\text{пр}}}{N} = \frac{0,118}{2} = 0,059 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

$$X_{0\phi} = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{экв}}} + \frac{0,0157}{N} =$$

$$= 0,1445 \cdot \lg \frac{11000}{65,7} + \frac{0,0157}{2} = 0,329 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

$$B_{0\phi} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{экв}}}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{11000}{65,7}} = 3,41 \cdot 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}.$$

Задача 1.3

Сопоставить удельные параметры схемы замещения воздушной линии напряжением $U_{\text{ном}} = 330$ кВ в первом варианте: с фазой, расщепленной на два провода $N = 2$ с шагом расщепления $a = 40$ см, и выполненной проводами марки АС 240/32; во втором варианте: с нерасщепленной фазой выполненной проводами марки АС 500/64.

Решение. Воспользуемся результатами, полученными для варианта исполнения линии с расщепленной фазой в задаче 1.2. Для варианта исполнения линии с нерасщепленной фазой выполним расчет аналогичный приведенному в задаче 1.1 для следующих справочных данных:

– среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линии: для линий 330 кВ $D_{\text{ср}} = 11$ м (см. справочные данные);

– диаметр провода: для провода марки АС 500/64 $d_{\text{пр}} = 30,6$ мм (см. справочные данные);

– удельное активное сопротивление: для провода марки АС 500/64 $R_0 = 0,058 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ (см. справочные данные):

Результаты сведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Удельные параметры схемы замещения
линии электропередачи**

Параметр	1 вариант: $2 \times \text{AC } 240/32$	2 вариант: AC 500/64
R_0 , Ом/км	0,059	0,058
X_0 , Ом/км	0,329	0,428
B_0 , См/км	$3,41 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$

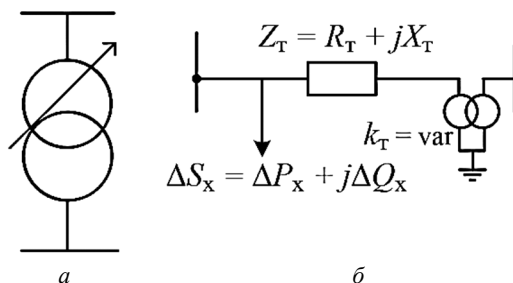
Удельное активное сопротивление для двух вариантов исполнения линии практически одинаковое, поскольку оно определяется только суммарным сечением проводов фазы: в первом варианте суммарное сечение проводов фазы $2 \times 240 = 480 \text{ мм}^2$, во втором варианте сечение проводов 500 мм^2 .

При расщеплении фазы на два провода удельное индуктивное сопротивление уменьшилось примерно на 40%, а емкостная проводимость увеличилась примерно на 40%, поскольку система из нескольких проводов в фазе эквивалентна одиночному проводу существенно большего радиуса: радиус одиночного провода большего сечения равен 15,3 мм, а эквивалентный радиус расщепленной фазы из двух проводов меньшего сечения равен 65,7 мм.

Задача 1.4

Рассчитать параметры схемы замещения двух параллельно работающих двухобмоточных трансформаторов ТРДЦН-63000/110.

Решение. Двухобмоточный трансформатор замещается Г-образной схемой (рис. 1.14).



**Рис. 1.14. Условное обозначение (a)
и схема замещения двухобмоточного трансформатора (б)**

Параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора:

– R_T и X_T – активное и реактивное сопротивления обмоток трансформатора;

– ΔP_x и ΔQ_x – активные и реактивные потери холостого хода трансформатора.

В схему замещения включен идеальный трансформатор, не имеющий сопротивлений и магнитных потоков рассеяния, отражающий коэффициент трансформации (k_T).

Для вычисления параметров схемы замещения трансформатора используются паспортные данные. Выпишем паспортные данные трансформатора ТРДЦН-63000/110 (см. справочные данные):

– номинальная мощность $S_{\text{ТНОМ}} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;

– номинальные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений $U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ}$;

– потери короткого замыкания $\Delta P_k = 260 \text{ кВт}$;

– относительное значение напряжения короткого замыкания $u_k = 10,5\%$;

– потери холостого хода $\Delta P_x = 59 \text{ кВт}$;

– относительное значение тока холостого хода $I_x = 0,6\%$.

Эквивалентное активное сопротивление двух параллельно работающих трансформаторов:

$$R_T = \frac{1}{n_T} \frac{\Delta P_k U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{260 \cdot 10^{-3} \cdot 115^2}{63^2} = 0,433 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление двух параллельно работающих трансформаторов:

$$X_T = \frac{1}{n_T} \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{63} = 11,0 \text{ Ом}.$$

Эквивалентные потери активной мощности в двух параллельно работающих трансформаторах при холостом ходе:

$$\Delta P_x = n_T \Delta P_x = 2 \cdot 59 = 118 \text{ кВт} = 0,118 \text{ МВт}.$$

Эквивалентные потери реактивной мощности в двух параллельно работающих трансформаторах при холостом ходе:

$$\Delta Q_x = n_T \frac{I_x}{100} S_{\text{ТНОМ}} = 2 \cdot \frac{0,6}{100} \cdot 63 = 0,756 \text{ Мвар.}$$

Обратите внимание: эквивалентные сопротивления обратно пропорциональны количеству параллельно работающих трансформаторов, а эквивалентные проводимости (потери холостого хода) – прямо пропорциональны. Аналогичная зависимость и для линий электропередачи.

Задача 1.5

Рассчитать параметры схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов АТДЦТН-63000/220/110.

Решение. Схема замещения трехобмоточного трансформатора (автотрансформатора) представляется трехлучевой звездой с сопротивлениями $Z_{\text{ТВ}}$, $Z_{\text{ТС}}$, $Z_{\text{ТН}}$ (рис. 1.15).

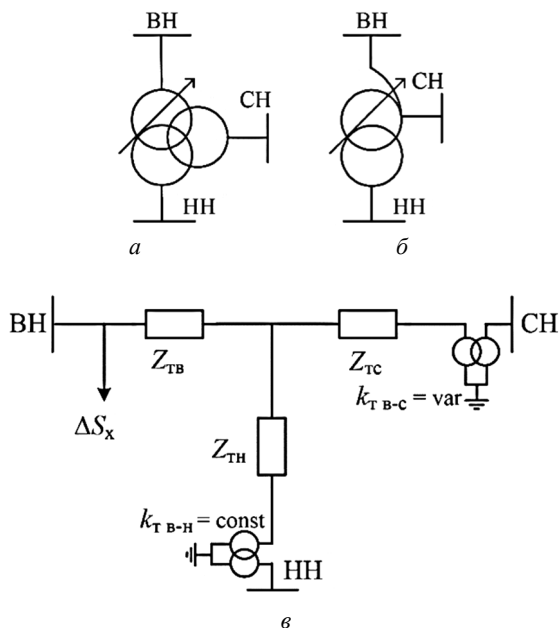


Рис. 1.15. Условные обозначения трехобмоточного трансформатора (а), автотрансформатора (б) и их схема замещения (в)

Выпишем паспортные данные автотрансформатора АТДЦТН-63000/220/110 (см. справочные данные):

- $S_{\text{ТНОМ}} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А};$
- $U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}; U_{\text{СН}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ};$
- $\Delta P_{\text{К В-С}} = 215 \text{ кВт};$
- $u_{\text{К В-Н}} = 35,7\%; u_{\text{К В-С}} = 11\%; u_{\text{К С-Н}} = 21,9\%;$
- $\Delta P_{\text{Х}} = 45 \text{ кВт};$
- $I_{\text{Х}} = 0,5\%.$

Мощность обмотки НН равна 50% от номинальной (т.е. $\alpha = 0,5$).

Эквивалентное активное сопротивление лучей схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов:

$$R_{\text{ТВ}} = R_{\text{ТС}} = \frac{1}{n_{\text{Т}}} \frac{\Delta P_{\text{К В-С}}}{2} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{215 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{230^2}{63^2} = 0,716 \text{ Ом}.$$

В силу того, что мощность обмотки НН составляет 0,5 от номинальной, то:

$$R_{\text{ТН.ЭКВ}} = \frac{R_{\text{ТВ.ЭКВ}}}{\alpha} = \frac{0,716}{0,5} = 1,432 \text{ Ом}.$$

Для вычисления индуктивных сопротивлений лучей схемы замещения необходимо предварительно определить напряжения короткого замыкания, относящиеся к каждому лучу схемы замещения через напряжения короткого замыкания пар обмоток, приведенных в паспортных данных:

$$u_{\text{КВ}} = 0,5(u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К В-Н}} - u_{\text{К С-Н}}) = 0,5 \cdot (11 + 35,7 - 21,9) = 12,4 \%;$$

$$u_{\text{КС}} = 0,5(u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-Н}}) = 0,5 \cdot (11 + 21,9 - 35,7) = -1,4 \%,$$

$$u_{\text{КН}} = 0\%;$$

$$u_{\text{КН}} = 0,5(u_{\text{К В-Н}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-С}}) = 0,5 \cdot (35,7 + 21,9 - 11) = 23,3 \%.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление лучей схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов:

$$X_{\text{ТВ}} = \frac{1}{n_{\text{Т}}} \frac{u_{\text{КВ}}}{100} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{12,4}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 52,1 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ТС}} = \frac{1}{n_{\text{Т}}} \frac{u_{\text{КС}}}{100} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 0 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ТН}} = \frac{1}{n_{\text{Т}}} \frac{u_{\text{КН}}}{100} \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{23,3}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 97,8 \text{ Ом}.$$

Эквивалентные потери активной мощности в двух параллельно работающих автотрансформаторах при холостом ходе:

$$\Delta P_{\text{х}} = n_{\text{Т}} \Delta P_{\text{х}} = 2 \cdot 45 = 90 \text{ кВт} = 0,09 \text{ МВт}.$$

Эквивалентные потери реактивной мощности в двух параллельно работающих автотрансформаторах при холостом ходе:

$$\Delta Q_{\text{х}} = n_{\text{Т}} \frac{I_{\text{х}}}{100} S_{\text{ТНОМ}} = 2 \cdot \frac{0,5}{100} \cdot 63 = 0,63 \text{ Мвар}.$$

Задача 1.6

Определить значение мощности нагрузки в узле, если нагрузка задана в виде статических характеристик нагрузок:

$$P_{*}(U_{*}) = 0,2 + 0,8 U_{*} ; \quad Q_{*}(U_{*}) = 9,5 - 20,5 U_{*} + 12 U_{*}^2 .$$

Номинальная мощность нагрузки (при номинальном напряжении $U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ}$) равна $S_{\text{Н}}(U_{\text{НОМ}}) = 60 + j40 \text{ МВА}$. Фактическое напряжение в узле нагрузки $U_{\text{Н}} = 10,4 \text{ кВ}$.

Решение. Фактическое напряжение в узле нагрузки в относительных единицах номинального напряжения:

$$U_{*} = \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{10,4}{10} = 1,04 .$$

Мощность в узле нагрузки при напряжении U_n в относительных единицах номинальной мощности составит:

$$P(U) = 0,2 + 0,8U = 0,2 + 0,8 \cdot 1,04 = 1,032;$$

$$Q(U) = 9,5 - 20,5U + 12U^2 = 9,5 - 20,5 \cdot 1,04 + 12 \cdot 1,04^2 = 1,159.$$

Получаем, что для заданных статических характеристик нагрузки увеличение напряжения в узле на 4% приведет к увеличению потребляемой мощности на 3,2%, а реактивной на 15,9%.

Мощность в узле нагрузки при напряжении U_n в абсолютных единицах составит:

$$P_n(U_n) = 60 \cdot 1,032 = 61,9 \text{ МВт};$$

$$Q_n(U_n) = 40 \cdot 1,159 = 46,4 \text{ Мвар}.$$

2. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

2.1. Построение векторной диаграммы

Для понимания алгоритмов расчета режимов и вывода основных расчетных формул рассмотрим решение задачи расчета режима графическим способом – построением векторной диаграммы фазных токов и напряжений, опираясь на базовые знания из теоретических основ электротехники.

Рассмотрим простейшую электрическую сеть, состоящую из одной воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением до 220 кВ, связывающей источник питания (узел 1) с потребителем электроэнергии (электрической нагрузкой – узел 2) (рис. 2.1, а). Пусть будут заданы параметры режима в узле нагрузки: модуль вектора фазного напряжения в узле 2 U_2 , модуль фазного тока нагрузки I_2 и угол φ_2 между ними. Необходимо построением векторной диаграммы определить параметры режима в узле 1: вектор фазного напряжения $\dot{U}_1$ и фазный ток источника питания $\dot{I}_1$.

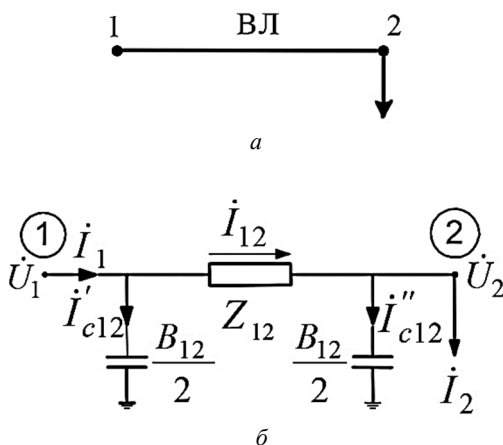


Рис. 2.1. Схема рассматриваемой сети (а) и ее схема замещения (б)

Схема замещения воздушной линии напряжением до 220 кВ представляет собой П-образную схему замещения (см. раздел 1.1) с продольным активным и индуктивным сопротивлениями R_{12} и X_{12} соответственно и емкостной проводимостью B_{12} . Параметры схемы замещения определяются по выражениям, приведенным в разделе 1.1. Схема замещения рассматриваемой сети приведена на рис. 2.1, б. Обозначим ток в продольном сопротивлении линии $\dot{I}_{12}$, в емкостной проводимости – $\dot{I}_{c12}$.

1. Для удобства построения векторной диаграммы примем, что вектор напряжения в узле 2 направлен вдоль действительной оси (рис. 2.2) (это допущение не оказывает влияние на результат построения).

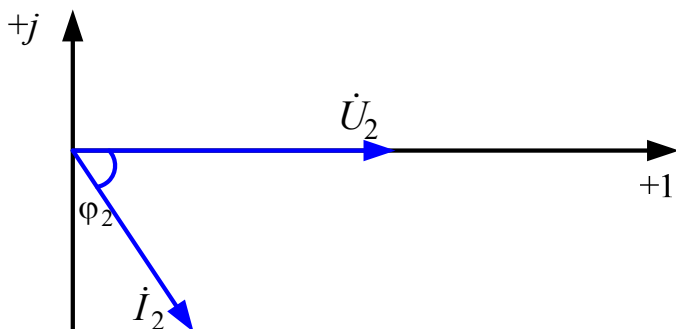


Рис. 2.2. Заданные параметры режима

Поскольку в конце линии подключен потребитель электроэнергии (а не абстрактное значение тока I_2), а его нагрузка (см. раздел 1.3) носит активно-индуктивный характер, то ток $\dot{I}_2$ будет отставать от вектора $\dot{U}_2$ на заданный угол φ_2 (из теоретических основ электротехники известно, что ток в индуктивности отстает от напряжения по фазе на 90° ; в активном сопротивлении они сонаправлены; в емкости – ток опережает вектор напряжения на 90°).

2. По известному напряжению $\dot{U}_2$ и значению емкостной проводимости B_{12} можно определить ток в емкостной проводимости $\dot{I}_{c12}''$:

$$\dot{I}_{c12}'' = j \frac{B_{12}}{2} \dot{U}_2.$$

На векторной диаграмме (рис. 2.3) откладываем ток $\dot{I}_{c12}''$, опережающий на 90° $\dot{U}_2$.

3. По 1-му закону Кирхгофа ток $\dot{I}_{12}$ можно определить:

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{c12}''.$$

Векторным сложением $\dot{I}_{c12}''$ и $\dot{I}_2$ на диаграмме (рис. 2.3) получаем $\dot{I}_{12}$.

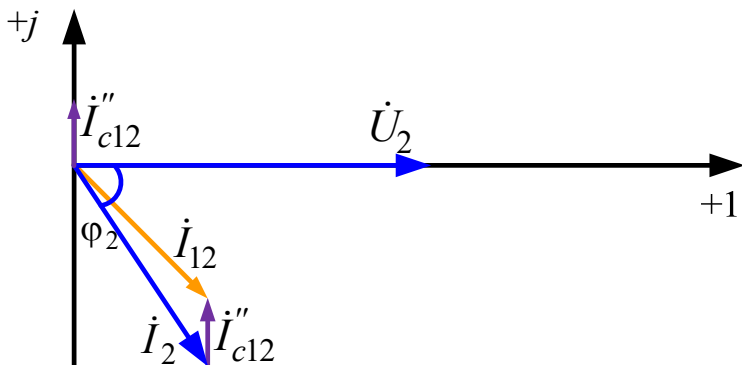


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов в ветвях узла 2

4. Падение напряжения в продольном сопротивлении линии по закону Ома равно:

$$\Delta \dot{U}_{12} = \dot{I}_{12} (R_{12} + jX_{12}).$$

Для удобства графического построения на диаграмме (рис. 2.4) отдельно откладываем вектор падения напряжения на активном сопротивлении (сонаправлен с током $\dot{I}_{12}$) и на индуктивном сопротивлении (опережает на 90° ток $\dot{I}_{12}$).

5. При передвижении по электрической цепи от узла 2 к узлу 1 против тока напряжения в узлах будут увеличиваться, т.е. $U_1 > U_2$. Поэтому вектор напряжения в узле 1 будет определяться как сумма вектора напряжения в узле 2 и вектора падения напряжения:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_{12}.$$

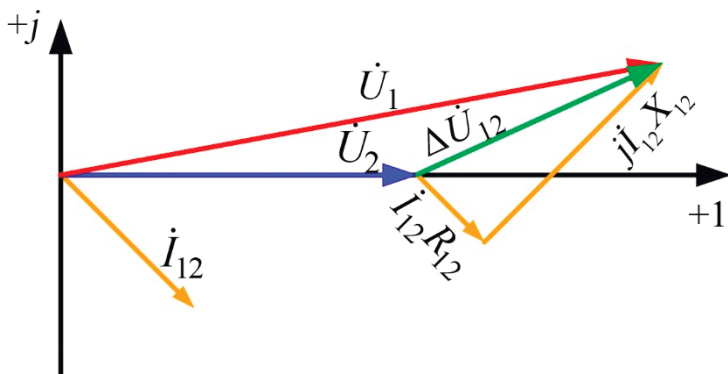


Рис. 2.4. Векторная диаграмма напряжений узлов 1 и 2

6. По найденному напряжению $\dot{U}_1$ ток в емкостной проводимости $\dot{I}'_{c12}$ (рис. 2.5) может быть определен:

$$\dot{I}'_{c12} = j \frac{B_{12}}{2} \dot{U}_1.$$

7. По 1-му закону Кирхгофа искомый ток $\dot{I}_1$:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} + \dot{I}'_{c12}.$$

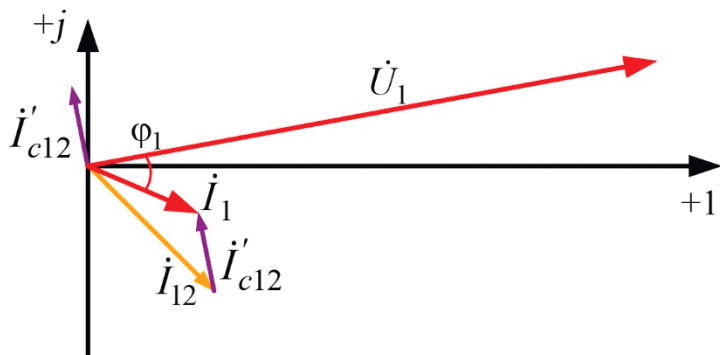


Рис. 2.5. Векторная диаграмма токов в ветвях узла 1

В результате построения векторной диаграммы (рис. 2.6) графически решена задача расчета режима: по заданным параметрам режима $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ определены параметры режима $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$.

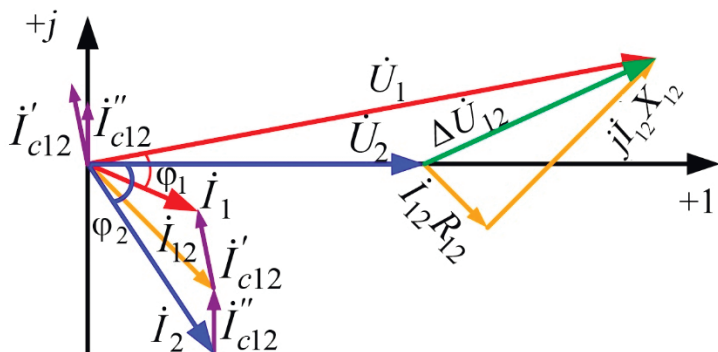


Рис. 2.6. Векторная диаграмма токов и напряжений электрической сети на рис. 2.1

Диаграмма построена исходя из предположения, что начальная фаза вектора $\dot{U}_2$ равна 0, т.е. вектор $\dot{U}_2$ сонаправлен с действительной осью. Если вектор имеет фазу отличную от 0, то это равносильно повороту всей векторной диаграммы на этот угол относительно действительной оси. Взаимное расположение всех

векторов относительно друг друга не изменится, так как точкой отсчета был вектор $\dot{U}_2$, а не оси координат. Следовательно, результаты построения векторной диаграммы могут быть распространены на любое исходное положение вектора $\dot{U}_2$ в пространстве.

2.2. Зависимость напряжений по концам линии электропередачи от передаваемой мощности

В электроэнергетике параметрами режима являются напряжения в узлах и мощности (а не токи) в ветвях. Получим из векторной диаграммы расчетные выражения для определения напряжений в узлах через заданные мощности, а не через заданные токи. Поскольку начальная фаза вектора не оказывает влияние на углы между векторами на полученной векторной диаграмме, а будет влиять только на угол всех векторов относительно осей, то «откажемся» на диаграмме от осей взяв за точку отсчета вектор $\dot{U}_2$ (рис. 2.7).

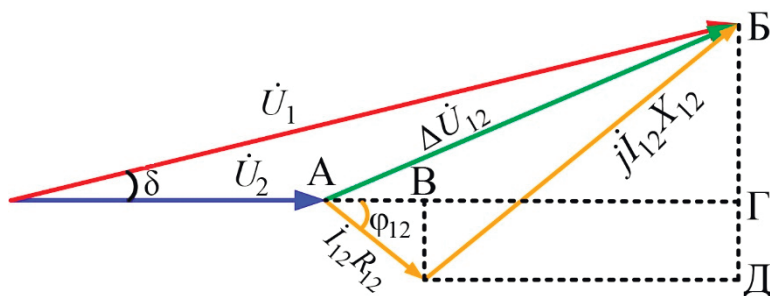


Рис. 2.7. Векторная диаграмма напряжений электрической сети на рис. 2.1

Разложим вектор падения напряжения $\Delta \dot{U}_{12}$ на две составляющие – продольную ΔU_{12} , совпадающую с направлением вектора $\dot{U}_2$ и поперечную δU_{12} – перпендикулярную направлению вектора $\dot{U}_2$. Поскольку фаза вектора $\dot{U}_2$ принята равной 0, то вектор $\dot{U}_2$

превращается в действительное число U_2 . Тогда относительно $\dot{U}_2$ вектор $\dot{U}_1$ может быть найден:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_{12} = U_2 + \Delta U_{12} + j\delta U_{12}.$$

Кроме падения напряжения существует и другая характеристика режима – потеря напряжения, которая вычисляется как разность модулей напряжений по концам линии: $|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|$.

Необходимо различать падение напряжения и потерю напряжения (рис. 2.8):

– падение напряжения – вектор – это геометрическая разность векторов напряжений в начале и в конце линии. Вектор падения напряжения раскладывается на продольную и поперечную составляющую относительно направления известного вектора напряжения в одном из двух рассматриваемых узлов;

– потеря напряжения – скаляр – это алгебраическая разность модулей векторов напряжений в начале и в конце линии. Численно потеря напряжения, как видно из рис. 2.8, несколько больше продольной составляющей вектора падения напряжения.

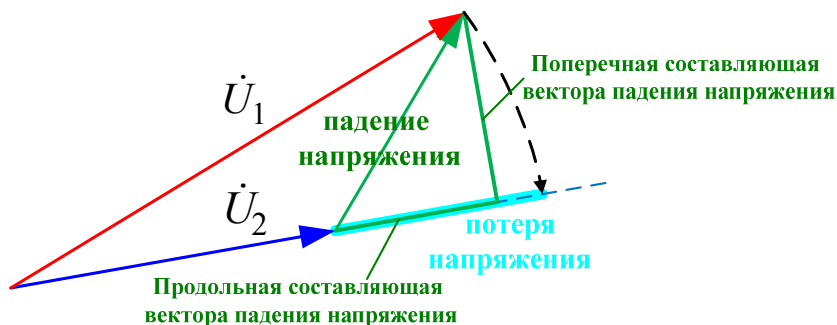


Рис. 2.8. Понятие падения и потери напряжения

Определим значения ΔU_{12} и δU_{12} через параметры режима (напряжения в узлах и мощности в ветвях). Из векторной диаграммы (рис. 2.7) видно, что продольная составляющая вектора падения напряжения ΔU_{12} равна отрезку АГ, а поперечная составляющая δU_{12} – отрезку БГ. В свою очередь:

$$АГ = АВ + ВГ; БГ = БД - ГД,$$

где отрезок АВ – это проекция вектора $\dot{I}_{12}R_{12}$ на ось вектора $\dot{U}_2$; отрезок ГД – это проекция вектора $\dot{I}_{12}R_{12}$ на ось перпендикулярную вектору $\dot{U}_2$; отрезок ВГ – это проекция вектора $\dot{I}_{12}X_{12}$ на ось вектора $\dot{U}_2$; отрезок БД – это проекция вектора $\dot{I}_{12}X_{12}$ на ось перпендикулярную вектору $\dot{U}_2$.

Принимая это во внимание, можно записать:

$$АВ = I_{12}R_{12}\cos\varphi_{12};$$

$$ГД = I_{12}R_{12}\sin\varphi_{12};$$

$$ВГ = I_{12}X_{12}\sin\varphi_{12};$$

$$БД = I_{12}X_{12}\cos\varphi_{12}.$$

Произведение $I_{12}\cos\varphi_{12}$ – это активная составляющая тока; $I_{12}\sin\varphi_{12}$ – реактивная составляющая тока, т.е.:

$$I_{12}\cos\varphi_{12} = I_{12a};$$

$$I_{12}\sin\varphi_{12} = I_{12p}.$$

Переходя от фазных значений к линейным, получим:

$$\Delta U_{12} = \sqrt{3}(I_{12a} \cdot R_{12} + I_{12p} \cdot X_{12});$$

$$\delta U_{12} = \sqrt{3}(I_{12a} \cdot X_{12} - I_{12p} \cdot R_{12}).$$

Выразим токи в линии через мощность, передающуюся по линии (рис. 2.9)

$$I_{12a} = \frac{P_{12}''}{\sqrt{3} \cdot U_2};$$

$$I_{12p} = \frac{Q_{12}''}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

и получим искомые расчетные выражения:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}^* \cdot R_{12} + Q_{12}^* \cdot X_{12}}{U_2};$$

$$\delta U_{12} = \frac{P_{12}^* \cdot X_{12} - Q_{12}^* \cdot R_{12}}{U_2}$$

или, если известны (заданы) параметры режима со стороны узла 1 $P_{12}^{'}$, $Q_{12}^{'}$, U_1 , то:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}^{'} \cdot R_{12} + Q_{12}^{'} \cdot X_{12}}{U_1};$$

$$\delta U_{12} = \frac{P_{12}^{'} \cdot X_{12} - Q_{12}^{'} \cdot R_{12}}{U_1}.$$

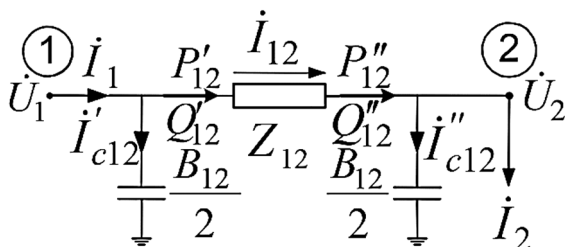


Рис. 2.9. Схема замещения сети, приведенной на рис. 2.1, с обозначением мощностей в ветвях

Окончательно получаем выражение, связывающее напряжения двух соседних узлов 1 и 2 через мощность, передаваемую по линии (ветви) между ними от узла 1 к узлу 2:

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{P_{12}'' \cdot R_{12} + Q_{12}'' \cdot X_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}'' \cdot X_{12} - Q_{12}'' \cdot R_{12}}{U_2} \quad (2.1)$$

или

$$\dot{U}_2 = U_1 - \frac{P_{12}' \cdot R_{12} + Q_{12}' \cdot X_{12}}{U_1} + j \frac{P_{12}' \cdot X_{12} - Q_{12}' \cdot R_{12}}{U_1}.$$

2.3. Анализ векторной диаграммы

В разделе 2.1 описано построение векторной диаграммы токов и напряжений ветви электрической сети, на основе которой в разделе 2.2 выведено расчетное выражение, связывающее напряжения по концам ветви. В данном разделе проанализируем полученные результаты и введем некоторые упрощения для различных частных случаев.

1. Учитывая фактические длины линий электропередачи напряжением до 220 кВ включительно и величины передаваемых по ним мощностей, получим, что угол между векторами напряжений по концам линии (двух соседних узлов) δ_{12} (рис. 2.7) не превосходит величину в 2–3°. Тогда, можно пренебречь изменением фазы напряжений в узлах сети и условно считать, что фазы векторов напряжений одинаковы. В результате рассчитывать необходимо только модули векторов напряжений (фазы у них принимаются одинаковыми). Выражение (2.1) преобразуется к виду:

$$U_1 = \sqrt{\left(U_2 + \frac{P_{12}'' \cdot R_{12} + Q_{12}'' \cdot X_{12}}{U_2} \right)^2 + \left(\frac{P_{12}'' \cdot X_{12} - Q_{12}'' \cdot R_{12}}{U_2} \right)^2}. \quad (2.2)$$

2. Оценим влияние емкостных проводимостей воздушных линий электропередачи на параметры режима. На рисунке 2.10 приведены две векторные диаграммы токов и напряжений – одна идентична рис. 2.6, а вторая построена при условии пренебрежения емкостной проводимостью. Сопоставление векторных диаграмм двух электрических цепей (с и без емкостной проводимости) показывает, что емкостная проводимость способствует уменьшению продольной составляющей вектора падения напряжения и увеличению поперечной составляющей вектора падения напряжения, а также угла между векторами напряжений начала и конца цепи. Как следствие, это приводит к снижению потери напряжения. Возможно подобрать такое значение емкостной проводимости, чтобы при передаче по линии активной мощности потери напряжения в ней были равны нулю.

Таким образом, регулирование режимов работы электрических сетей (см. последующие тома данной серии учебников) возможно с помощью специально подключаемых в узлы сети емкостных проводимостей (шунтовых батарей конденсаторов). Это мероприятие называется компенсацией реактивной мощности.

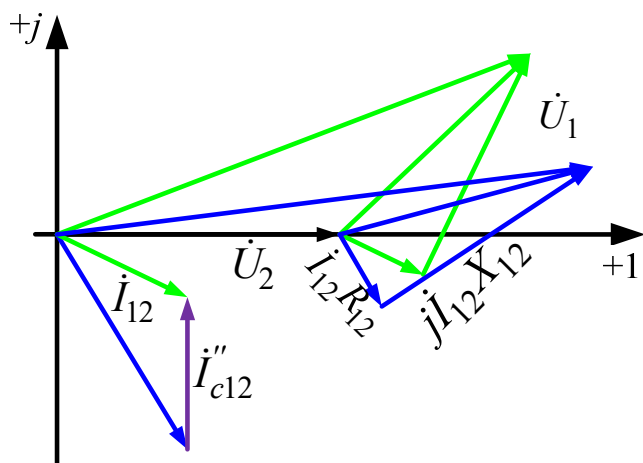


Рис. 2.10. Векторная диаграмма токов и напряжений электрической сети на рис. 2.1 с учетом (построения зеленым цветом) и без учета (построения синим цветом) емкостных проводимостей

3. В электрических сетях напряжением 35–110 кВ включительно значение активного и индуктивного сопротивления сопоставимы (одно значение больше или меньше другого не более чем в 3,5 раза), а передаваемая активная мощность превосходит реактивную не менее чем в два раза. Следовательно, поперечная составляющая вектора падения напряжения будет относительно небольшой (рис. 2.11) и ей можно пренебречь в сравнении с величиной $(U_2 + \Delta U_{12})$.

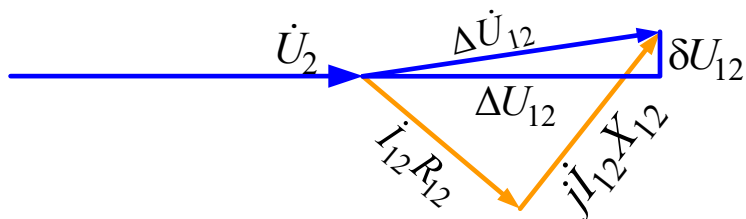


Рис. 2.11. Векторная диаграмма токов и напряжений электрической сети на рис. 2.1 для случая примерного равенства активного и реактивного сопротивления и передаваемой по линии активной и реактивной мощности

Поэтому в электрических сетях напряжением до 110 кВ включительно поперечной составляющей вектора падения напряжения пренебрегают и расчетное выражение (2.2) преобразуется к виду:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_{12}' \cdot R_{12} + Q_{12}' \cdot X_{12}}{U_2}. \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) следует, что в сетях напряжением до 110 кВ включительно численно потеря напряжения равна продольной составляющей вектора падения напряжения.

2.4. Особенности режима холостого хода линии

Рассмотрим режим холостого хода воздушной линии (рис. 2.1) – отключение нагрузки в конце линии, т.е. $I_2 = 0$. Для этого построим векторную диаграмму токов и напряжений аналогичную нормальному режиму работы (рис. 2.6).

Поскольку ток нагрузки в узле 2 $I_2 = 0$, то ток I_{12} будет определяться только емкостным током конца линии i_{c12}'' . Выполнив все построения по алгоритму, изложенному в разделе 2.1, получим векторную диаграмму, приведенную на рис. 2.12. Сопоставляя векторные диаграммы на рис. 2.6 и рис. 2.12 можно заключить, что в режиме холостого хода:

- ток в начале линии i_1 опережает по фазе напряжение $\dot{U}_1$;
- напряжение в начале линии по модулю меньше напряжения в конце линии: $|\dot{U}_1| < |\dot{U}_2|$.

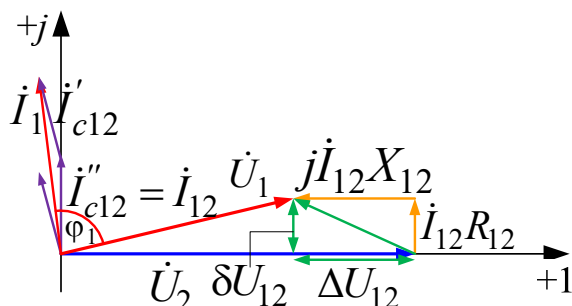


Рис. 2.12. Векторная диаграмма токов и напряжений электрической сети на рис. 2.1 в режиме холостого хода

Никакого противоречия в этом нет: поскольку нагрузка в конце линии в режиме холостого хода отсутствует, то конец линии из-за наличия емкостной проводимости «превращается в генератор» реактивной мощности, которая передается к шинам источника питания, т.е. мощность по линии передается от узла 2 (узла с отключенной нагрузкой) к узлу 1 (узлу источника питания). В результате чего напряжение в узле 2 становится больше, чем в узле 1.

Учитывая тот факт, что напряжение на источнике питания специально поддерживается на определенном уровне, то напряжение на конце линии электропередачи в режиме холостого хода будет возрастать тем больше, чем больше протяженность линии. Это может привести к значительному повышению напряжения в конце линии сверх допустимого уровня. Поэтому для протяженных воздушных линий (длиной более нескольких сотен километров) предусматривают специальные мероприятия по недопущению такого роста напряжения в режиме холостого хода.

Данный факт позволяет сделать вывод: если в узле увеличивается генерация или уменьшается потребление реактивной мощности, то в этом узле будет наблюдаться увеличение напряжения и наоборот, т.е. обеспечение баланса реактивной мощности в каждом узле позволяет добиваться и желаемых уровней напряжения в этих узлах.

Результаты, полученные в данной главе на примере простейшей электрической сети, состоящей из одной линии электропередачи, могут быть распространены и на более сложные схемы электрических сетей, состоящие не только из участков линий, но и трансформаторных подстанций. Методы расчета режимов электрических сетей различных конфигураций рассмотрены в последующих главах.

Примеры решения задач

Задача 2.1

В режиме холостого хода на конце одноцепной ($n_{\text{ц}} = 1$) воздушной линии напряжением $U_{\text{ном}} = 110$ кВ длиной $L = 50$ км, выполненной проводами марки АС 240/32, напряжение составило 122 кВ.

Определить, насколько увеличилось напряжение в конце линии электропередачи в режиме холостого хода относительно напряжения начала линии.

Расчеты также произвести и для одноцепной воздушной линии напряжением $U_{\text{ном}} = 330$ кВ длиной 300 км с фазой, расщепленной на два провода $N = 2$ с шагом расщепления $a = 40$ см, и выполненной проводами марки АС 240/32, если напряжение в конце линии составило 360 кВ.

Решение. Для решения задачи необходимо определить напряжение в начале линии. В сетях с воздушными линиями напряжением 110 кВ допустимо пренебрегать поперечной составляющей вектора падения напряжения. В этих условиях потеря напряжения численно равна продольной составляющей вектора падения напряжения

Согласно векторной диаграмме в режиме холостого хода (рис. 2.12) продольная составляющая вектора падения напряжения ΔU_{12} может быть вычислена как: $|\dot{I}_{12}|X_{12}$. Ток в линии $\dot{I}_{12}$ будет определяться только емкостным током конца линии $\dot{I}_{c12}^*$. В свою очередь емкостной ток конца линии: $\dot{I}_{c12}^* = j \frac{B_{12}}{2} \dot{U}_2$.

Для рассматриваемой линии 110 кВ (см. задачу 1.1) индуктивное сопротивление $X_{12} = 20,0$ Ом, емкостная проводимость: $B_{12} = 142,2 \cdot 10^{-6}$ См.

Тогда для рассматриваемого режима холостого хода:

$$\begin{aligned} \Delta U_{12} &= |\dot{I}_{12}|X_{12} = |\dot{I}_{c12}^*|X_{12} = \frac{B_{12}}{2} X_{12} U_2 = \\ &= \frac{142,2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 20 \cdot 122 = 0,350 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Получаем, что напряжение в конце линии увеличится «всего лишь» на 0,35 кВ или 0,32%.

Совершенно другая картина будет наблюдаться на более протяженных линиях сверхвысоких классов напряжения. Для рассматриваемой линии 330 кВ (см. задачу 1.3) индуктивное сопротивление $X_{12} = 98,7$ Ом, емкостная проводимость: $B_{12} = 1023 \cdot 10^{-6}$ См.

В режиме холостого хода:

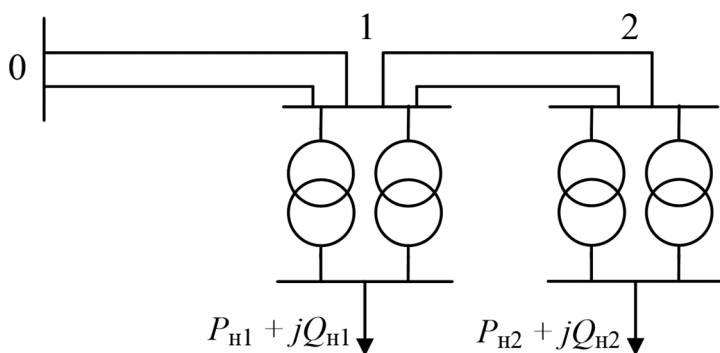
$$\begin{aligned} \Delta U_{12} &= |\dot{I}_{12}|X_{12} = |\dot{I}_{c12}^*|X_{12} = \frac{B_{12}}{2} X_{12} U_2 = \\ &= \frac{1023 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 98,7 \cdot 360 = 18,2 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Напряжение в конце линии увеличится на 18,2 кВ или 5,5%.

3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЕЙШИХ РАЗОМКНУТЫХ СЕТЕЙ

3.1. Приведенная и расчетная нагрузка

Как правило, в качестве исходных данных нагрузки потребителей задаются на шинах низшего, а не высшего напряжения понижающих подстанций. Поэтому схемы замещения электрических сетей, помимо линий электропередачи (как показано в гл. 2), содержат и трансформаторные ветви. Даже для относительно небольших схем электрических сетей (рис. 3.1), состоящих из нескольких линий электропередачи и нескольких понижающих подстанций, схема замещения будет выглядеть достаточно громоздко (рис. 3.2), и производить расчет режима по ней вручную представляется достаточно сложно. Поэтому для визуального упрощения схемы замещения электрической сети при ручных расчетах режимов трансформаторные ветви последовательно заменяют приведенной, а затем расчетной нагрузкой подстанции (рис. 3.3). Объем расчетов при этом не изменяется: часть расчетов просто переносится на этап определения приведенных и расчетных нагрузок.



**Рис. 3.1. Пример схемы магистральной сети
(две линии электропередачи и две понижающие подстанции)**

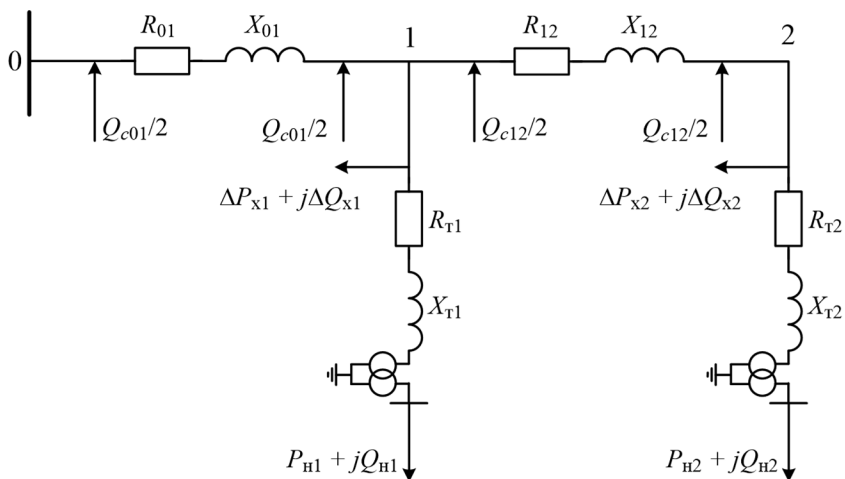


Рис. 3.2. Схема замещения электрической сети, приведенной на рис. 3.1

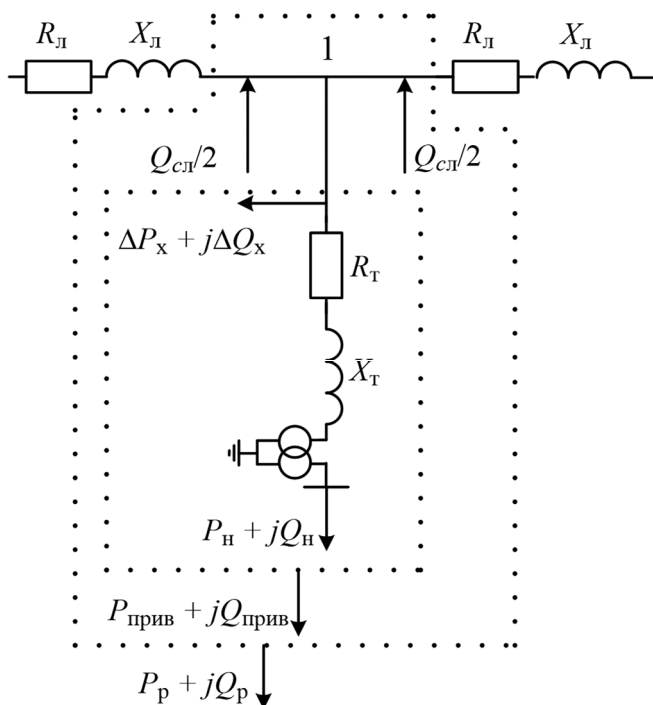


Рис. 3.3. Понятие приведенной и расчетной нагрузки подстанции

Приведенная к шинам высшего напряжения подстанции нагрузка $P_{\text{прив}} + jQ_{\text{прив}}$ отличается от исходной нагрузки на шинах низшего напряжения на величину потерь мощности в сопротивлении обмоток трансформаторов $R_T + jX_T$ (вывод формулы см. раздел 3.2) и потерь холостого хода трансформаторов $\Delta P_x + j\Delta Q_x$:

$$P_{\text{прив}} + jQ_{\text{прив}} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}} + \Delta P_T + j\Delta Q_T + \Delta P_x + j\Delta Q_x;$$

$$\Delta P_T + j\Delta Q_T = \frac{P_{\text{н}}^2 + Q_{\text{н}}^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot (R_T + jX_T).$$

Расчетная нагрузка подстанции (узла нагрузки) $P_p + jQ_p$ определяется как алгебраическая сумма приведенной нагрузки и половины зарядных мощностей всех линий, связанных с данным узлом:

$$P_p + jQ_p = P_{\text{прив}} + jQ_{\text{прив}} - j \sum \frac{Q_{cij}}{2}.$$

В результате схема замещения электрической сети, приведенная на рис. 2.2, преобразуется к виду, показанном на рис. 3.4.

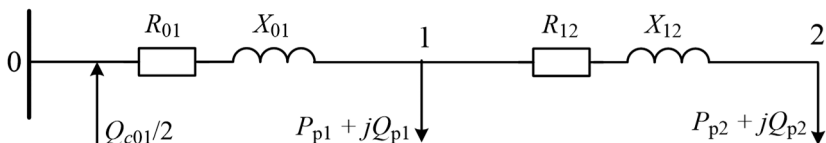


Рис. 3.4. Расчетная схема электрической сети, приведенной на рис. 3.1

Введение приведенных и расчетных нагрузок вносит некоторую погрешность в расчет параметров режима, поскольку потери мощности в сопротивлениях обмоток трансформаторов и зарядные мощности линий электропередачи рассчитываются не по фактическим напряжениям в узлах, а по номинальному напряжению. Но для расчетов режима вручную такая погрешность считается допустимой.

3.2. Постановка задачи расчета режима

В зависимости от исходных данных: задано одно из напряжений ($U_{\text{ип}}$ или U_1) и одна из мощностей в начале ($S_{\text{ип}}$) или в конце ($S_{\text{прив1}}$) сети (рис. 3.5), задача расчета режима как единичной линии, так и разомкнутой сети с произвольным числом участков (линий электропередачи, трансформаторов), решается разными методами. Параметры схемы замещения рассчитываемой электрической сети считаются заданными и предварительно рассчитанными.

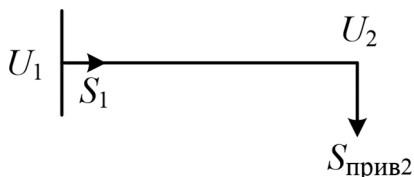


Рис. 3.5. Схема простейшей радиальной сети

Возможны четыре различных варианта постановки задачи расчета режима:

- 1) по данным начала передачи, когда известны параметры режима в начале передачи (U_1, S_1), а требуется определить параметры режима в конце передачи ($U_2, S_{\text{прив2}}$);
- 2) по данным конца передачи, когда известны параметры режима в конце передачи ($U_2, S_{\text{прив2}}$), а требуется определить параметры режима в начале передачи (U_1, S_1);
- 3) расчет режима по известному напряжению в начале (U_1) и мощности в конце передачи ($S_{\text{прив2}}$). Требуется определить U_2 и S_1 ;
- 4) расчет режима по известному напряжению в конце (U_2) и мощности в начале передачи (S_1). Требуется определить U_1 и $S_{\text{прив2}}$.

Первые два варианта постановки задачи расчета режима решаются прямыми методами; в последних двух вариантах, как будет показано далее, решение не может быть найдено прямыми методами, поэтому используют приближенные итерационные методы.

Расчеты режимов электрической сети, как отмечалось выше, проводятся в форме напряжений и мощностей, а не токов. Поэтому необходимо известные из электротехники расчетные выражения, в которых фигурируют напряжение и ток, привести в форму записи через напряжение и мощность.

Требуемые выражения для падения напряжения были получены во второй главе. Выразим потери полной мощности $\Delta \dot{S}$ на участке цепи (рис. 3.6) через передаваемую полную мощность и вектор напряжения. Необходимо отметить, что в электрических сетях принято оперировать линейными (междуфазными) напряжениями $\dot{U}$, фазными токами $\dot{I}$ и трехфазными мощностями $\dot{S}$.

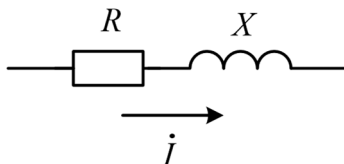


Рис. 3.6. Участок электрической цепи

Учитывая выражение для полной мощности через напряжение и ток $\dot{S} = \sqrt{3} \dot{U} \hat{I}$, получим:

$$\Delta \dot{S} = 3 \left| \dot{I} \right|^2 Z = \frac{\left| \dot{S} \right|^2}{\left| \dot{U} \right|^2} Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot (R + jX).$$

Введем допущения по расчету установившихся режимов электрических сетей и обозначения параметров режимов и параметров схем замещения.

1. В электрических сетях напряжением до 220 кВ включительно угол вектора падения напряжения составляет не более нескольких градусов. Поэтому при расчетах режимов вручную фазы векторов напряжения пренебрегают, рассчитывая только модули векторов напряжения.

2. В обозначении параметров схемы замещения электрической сети и мощностей в ветвях нижним индексом указывают последовательно узел начала ветви и узел окончания ветви.

3. Из-за потерь мощности в сопротивлении ветви, мощность до сопротивления отличается от мощности после сопротивления на величину потерь мощность. Для отличия этих мощностей у мощности в начале ветви (до сопротивления) принят верхний индекс – «'», у мощности в конце ветви – «"». Аналогично у зарядных мощностей линий – у зарядной мощности в начале ветви, определяемой по напряжению узла начала ветви, верхний индекс «'», у зарядной мощности в конце ветви, определяемой по напряжению узла конца ветви, верхний индекс «"». Если зарядная мощность определена по номинальному напряжению при определении расчетных нагрузок (см. раздел 3.1), то верхний индекс не ставится.

4. Поскольку индексов у параметров режима и схем замещения достаточно много, а также учитывая, что напряжения определяются только по модулю, то принято опускать обозначения векторов и комплексных величин:

– полная мощность – S . Во всех расчетах полная мощность S численно представляется только как активная P и реактивная Q составляющая, т.е. если не оговорено специально, то: $S = P + jQ$;

– полное сопротивление – Z . Во всех расчетах полное сопротивление Z численно представляется только как активная R и реактивная X составляющая, т.е. если не оговорено специально, то: $Z = R + jX$;

– модуль вектора напряжения – U .

5. Вектор падения напряжения представляется двумя составляющими: продольной и поперечной, соответственно:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U};$$
$$\delta U = \frac{PX + QR}{U}.$$

6. В электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже поперечная составляющая не менее чем на порядок меньше номинального напряжения и ее учет практически не влияет на величину напряжений в узлах. Поэтому в электрических сетях номинальным напряжением 110 кВ и ниже при расчете установившихся режимов поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается.

Пример обозначения параметров схемы замещения электрической сети, приведенной на рис. 3.5, и режимных параметров приведен на рис. 3.7.

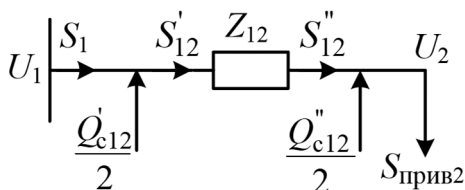


Рис. 3.7. Схема замещения электрической сети, приведенной на рис. 3.5

В результате расчет режима сводится к определению потерь мощности, продольной и поперечной составляющей вектора падения напряжения в сопротивлениях ветвей.

3.3. Алгоритм расчета режима элементарного участка электрической сети

Расчет по данным начала передачи. Схема замещения сети приведена на рис. 3.7.

1. Половина зарядной мощности в начале линии:

$$\frac{Q'_{c12}}{2} = \frac{U_1^2 B_{л}}{2}.$$

Поскольку значение напряжения в узле 1 известно, то зарядную мощность определяем не по номинальному напряжению сети.

2. Мощность в начале линии 12 определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна

сумме мощностей, вытекающих из него: $S'_{12} = S_1 + j \frac{Q'_{c12}}{2}$.

3. Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\Delta S_{12} = \frac{(S'_{12})^2}{U_1^2} Z_{12}.$$

Необходимо обратить внимание на принципиальный момент: если в формуле фигурирует значение мощности в начале ветви, то в нее подставляется значение напряжения в начале ветви и наоборот.

4. Мощность в конце линии 12: $S''_{12} = S'_{12} - \Delta S_{12}$.

При расчете от начала линии к ее концу по направлению тока / передаваемой мощности потери мощности вычитаются: мощность в конце линии меньше, чем в начале линии.

5. Для расчета зарядной мощности в конце ветви необходимо знать напряжение в узле 2. Расчет зарядной мощности по номинальному напряжению не точен. Поэтому далее рассчитывают продольную и поперечную составляющую вектора падения

напряжения на сопротивлении линии: $\Delta U_{12} = \frac{P'_{12} R_{12} + Q'_{12} X_{12}}{U_1}$;

$$\delta U_{12} = \frac{P'_{12} X_{12} - Q'_{12} R_{12}}{U_1}.$$

Необходимо обратить внимание на принципиальный момент: если в формуле фигурирует значение мощности в начале ветви, то в нее подставляется значение напряжения в начале ветви и наоборот.

$$\text{Напряжение в узле 2: } U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}.$$

При расчете от начала линии к ее концу по направлению тока / передаваемой мощности падение напряжение вычитается (при расчете только модуля напряжения – вычитается продольная составляющая): напряжение в конце линии меньше, чем в начале линии.

В электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается, т.е.: $U_2 = U_1 - \Delta U_{12}$.

6. Определив напряжение в узле конца ветви, можно считать половину зарядной мощности в конце линии:

$$\frac{Q_{c12}''}{2} = \frac{U_2^2 B_{л}}{2}.$$

7. Приведенная нагрузка узла 2 определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него: $S_{\text{прив}2} = S_{12}'' + j \frac{Q_{c12}''}{2}$.

Расчет по данным конца передачи. Схема замещения сети приведена на рис. 3.7.

1. Половина зарядной мощности в конце линии:

$$\frac{Q_{c12}''}{2} = \frac{U_2^2 B_{л}}{2}.$$

Поскольку значение напряжения в узле 2 известно, то зарядную мощность определяем не по номинальному напряжению сети.

2. Мощность в конце линии 12 определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него: $S_{12}'' = S_{\text{прив}2} - j \frac{Q_{c12}''}{2}$.

3. Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\Delta S_{12} = \frac{(S_{12}'')^2}{U_2^2} Z_{12}.$$

Необходимо обратить внимание на принципиальный момент: если в формуле фигурирует значение мощности в конце ветви, то в нее подставляется значение напряжения в конце ветви и наоборот.

4. Мощность в начале линии 12: $S_{12}' = S_{12}'' + \Delta S_{12}$.

При расчете от конца линии к ее началу против направления тока / передаваемой мощности потери мощности складываются: мощность в начале линии больше, чем в конце линии.

5. Для расчета зарядной мощности в начале ветви необходимо знать напряжение в узле 1. Расчет зарядной мощности по номинальному напряжению не точен. Поэтому далее рассчитывают продольную и поперечную составляющую вектора падения

напряжения на сопротивлении линии: $\Delta U_{12} = \frac{P_{12}'' R_{12} + Q_{12}'' X_{12}}{U_2}$;

$$\delta U_{12} = \frac{P_{12}'' X_{12} - Q_{12}'' R_{12}}{U_2}.$$

Необходимо обратить внимание на принципиальный момент: если в формуле фигурирует значение мощности в конце ветви, то в нее подставляется значение напряжения в конце ветви и наоборот.

$$\text{Напряжение в узле 1: } U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}.$$

При расчете от конца линии к ее началу против направления тока / передаваемой мощности падение напряжения складывается (при расчете только модуля напряжения – складывается продольная составляющая): напряжение в начале линии больше, чем в конце линии.

В электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается, т.е.: $U_1 = U_2 + \Delta U_{12}$.

6. Определив напряжение в узле начала ветви, можно рассчитать половину зарядной мощности в начале линии:

$$\frac{Q_{c12}'}{2} = \frac{U_1^2 B_{л}}{2}.$$

7. Мощность, выдаваемая источником питания в сеть, определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него:

$$S_1 = S_{12}' - j \frac{Q_{c12}'}{2}.$$

Расчет по известному напряжению в начале и мощности в конце передачи. Решить данную задачу прямыми методами (как две предыдущие задачи) невозможно: напряжение известно в одном узле, а нагрузка – в другом. Для нахождения потерь мощности и падения напряжения в сопротивлении линии необходимо знать и напряжение, и мощность со стороны одного узла.

Решение задач в такой постановке осуществляется итерационными методами. При ручном расчете режима наибольшее распространение нашел метод последовательных приближений – метод расчета «в 2 этапа». На 1-м этапе осуществляют расчет мощностей в ветвях схемы при нулевых приближениях напряжений в узлах сети $U_i^{(0)}$. В качестве начального (нулевого) приближения

принимается, что напряжения во всех узлах, кроме узла в котором напряжение задано, равны друг другу и равны номинальному. На 2-м этапе осуществляют расчет первых приближений напряжений в узлах $U_i^{(1)}$ по мощностям в ветвях, определенным на первом этапе. На этом первая итерация завершена. На 1-м этапе второй итерации расчет начинается из условия, что напряжение во всех узлах равно $U_i^{(1)}$. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность расчета, т.е. разность между двумя последовательными приближениями напряжений $(j-1)$ и (j) в узлах не станет меньше заданной точности ε :

$$\left| U_i^{(j)} - U_i^{(j-1)} \right| < \varepsilon.$$

Как показывает опыт расчетов методом «в 2 этапа» для необъемных схем электрических сетей напряжения, полученные на 2-м этапе первой итерации, близки к истинным значениям. Поэтому при расчетах режима вручную используют только одну первую итерацию.

Схема замещения сети приведена на рис. 2.7.

1-й этап. В качестве начального (нулевого) приближения принимаем, что $U_2^{(0)} = U_{\text{ном}}$.

Получаем, что в узле 2 известно и значение напряжения, и значение мощности. Расчет на 1-м этапе в значительной степени совпадает с расчетом по данным конца передачи.

1. Половина зарядной мощности в конце линии:

$$\frac{Q_{c12}}{2} = \frac{U_{\text{ном}}^2 B_{\text{л}}}{2}.$$

Поскольку значение напряжения в узле 2 неизвестно и было принято равным номинальному, то зарядную мощность определяем по номинальному напряжению сети.

2. Мощность в конце линии 12 определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него: $S_{12}'' = S_{\text{прив2}} - j \frac{Q_{c12}}{2}$.

3. Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\Delta S_{12} = \frac{(S_{12}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{12}.$$

На 1-м этапе потери мощности рассчитываются по нулевым приближениям напряжений в узлах сети, в качестве которых принято номинальное напряжение сети.

4. Мощность в начале линии 12: $S_{12}' = S_{12}'' + \Delta S_{12}$.

При расчете от конца линии к ее началу против направления тока / передаваемой мощности потери мощности складываются: мощность в начале линии больше, чем в конце линии.

5. Половина зарядной мощности в начале линии определяется по заданному напряжению в узле 1: $\frac{Q_{c12}'}{2} = \frac{U_1^2 B_{\text{л}}}{2}$.

6. Мощность, выдаваемая источником питания в сеть, определяется на основе первого закона Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него:

$$S_1 = S_{12}' - j \frac{Q_{c12}'}{2}.$$

Мощности во всех ветвях найдены – 1-й этап завершен.

2-й этап. По заданному напряжению U_1 и мощностям, рассчитанным на 1-м этапе, определяем напряжения в узлах схемы. Получаем, что в узле 1 известно и значение напряжения, и значение мощности. Расчет на 2-м этапе в значительной степени совпадает с расчетом по данным начала передачи.

Продольная и поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\Delta U_{12} = \frac{P'_{12} R_{12} + Q'_{12} X_{12}}{U_1};$$

$$\delta U_{12} = \frac{P'_{12} X_{12} - Q'_{12} R_{12}}{U_1}.$$

$$\text{Напряжение в узле 2: } U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}.$$

При расчете от начала линии к ее концу по направлению тока / передаваемой мощности падение напряжения вычитается (при расчете только модуля напряжения – вычитается продольная составляющая): напряжение в конце линии меньше, чем в начале линии.

В электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается, т.е.: $U_2 = U_1 - \Delta U_{12}$.

На этом при расчетах вручную расчет режима завершен – все неизвестные параметры режима – U_2 и S_1 – определены.

Расчет по известному напряжению в конце и мощности в начале передачи аналогичен предыдущему случаю. Только на 1-м этапе расчет выполняется от узла 1 к узлу 2 (как по данным начала передачи), а на 2-м этапе по заданному напряжению узла 2 и мощностям, определенным на 1-м этапе, определяется напряжение в узле 1 (как по данным конца передачи).

3.4. Расчет режимов разомкнутых электрических сетей произвольной конфигурации

Алгоритмы расчета, изложенные в разделе 3.3, могут быть распространены на любую конфигурацию разомкнутых электрических сетей (магистральных, разветвленных, с учетом трансформаторов и т.п.). Основным отличием в алгоритмах будет переход через промежуточные узлы схемы (например, узел 1 на рис. 3.4).

При расчете от конца передачи к началу, после того как найдена мощность в начале линии 12, необходимо «перейти» через узел 1 и определить мощность в конце линии 01. Для этого воспользуемся первым законом Кирхгофа: сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него. Тогда, получим: $S_{01}'' = S_{12}' + S_{p1}$.

При расчете от начала передачи к концу, наоборот: $S_{12}' = S_{01}'' - S_{p1}$.

Аналогично выполняется и расчет напряжений. При расчете от конца передачи к началу, по рассчитанному значению напряжения в узле 1 далее рассчитывается продольная и поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии 01 и напряжение в узле 0:

$$\begin{aligned}\Delta U_{12} &= \frac{P_{12}'' R_{12} + Q_{12}'' X_{12}}{U_2}; \\ \delta U_{12} &= \frac{P_{12}'' X_{12} - Q_{12}'' R_{12}}{U_2}; \\ U_1 &= \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}; \\ \Delta U_{01} &= \frac{P_{01}'' R_{01} + Q_{01}'' X_{01}}{U_1}; \\ \delta U_{01} &= \frac{P_{01}'' X_{01} - Q_{01}'' R_{01}}{U_1}; \\ U_0 &= \sqrt{(U_1 + \Delta U_{01})^2 + (\delta U_{01})^2}.\end{aligned}$$

При расчете от начала передачи к концу, по рассчитанному значению напряжения в узле 1 далее рассчитывается продольная и поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии 12 и напряжение в узле 2:

$$\Delta U_{01} = \frac{P'_{01} R_{01} + Q'_{01} X_{01}}{U_0}; \quad \delta U_{01} = \frac{P'_{01} X_{01} - Q'_{01} R_{01}}{U_0};$$

$$U_1 = \sqrt{(U_0 - \Delta U_{01})^2 + (\delta U_{01})^2}.$$

$$\Delta U_{12} = \frac{P'_{12} R_{12} + Q'_{12} X_{12}}{U_1}; \quad \delta U_{12} = \frac{P'_{12} X_{12} - Q'_{12} R_{12}}{U_1}.$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}.$$

Примеры решения задач

Задача 3.1

По двухцепной линии 220 кВ (эквивалентные параметры схемы замещения: $R_{\text{лип-1}} = 6,37 \text{ Ом}$, $X_{\text{лип-1}} = 23,2 \text{ Ом}$, $B_{\text{лип-1}} = 591,7 \cdot 10^{-6} \text{ См}$) получает питание ПС1, приведенная нагрузка которой $S_{\text{прив1}} = 150,7 + j77,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ (рис. 3.8). Напряжение на шинах ВН ПС1 должно составлять $U_1 = 215,3 \text{ кВ}$. Определить напряжение на шинах источника питания ($U_{\text{ип}}$), а также мощность, выдаваемую источником питания в сеть ($S_{\text{ип}}$).

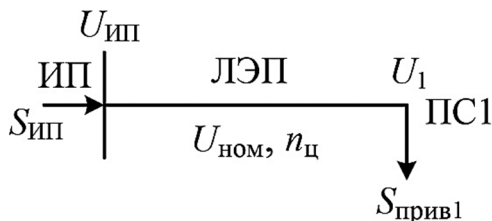


Рис. 3.8. Схема сети

Решение. Составим схему замещения сети, указав на ней мощности на всех участках (рис. 3.9).

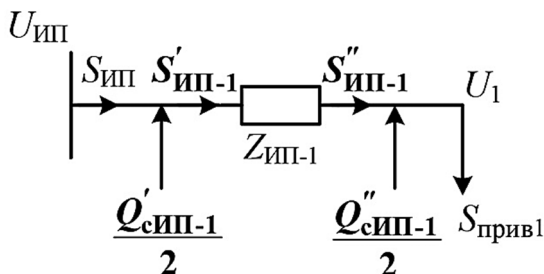


Рис. 3.9. Схема замещения сети

Половина зарядной мощности в конце линии:

$$\frac{Q''_{сИП-1}}{2} = \frac{U_1^2 B_{\text{л}}}{2} = \frac{215,3^2 \cdot 591,7 \cdot 10^{-6}}{2} = 13,7 \text{ Мвар.}$$

Обратите внимание: если известно напряжение в узле, то зарядная мощность рассчитывается не по номинальному напряжению, а по реальному (заданному).

Расчетная нагрузка ПС1:

$$\begin{aligned} S_{\text{р1}} &= S_{\text{прив1}} - j \frac{Q'_{сИП-1}}{2} = 150,7 + j77,7 - j13,7 = \\ &= 150,7 + j64,0 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Мощность в конце линии ИП-1:

$$S''_{\text{ИП-1}} = S_{\text{р1}} = 150,7 + j64 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Потери мощности в сопротивлении линии ИП-1:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{ИП-1}} &= \frac{(S''_{\text{ИП-1}})^2}{U_1^2} Z_{\text{ИП-1}} = \frac{150,7^2 + 64^2}{215,3^2} \cdot (6,37 + j23,2) = \\ &= 3,68 + j13,4 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Обратите внимание на принцип: если в формуле фигурирует значение мощности в конце ветви, то в нее подставляется значение напряжения в конце ветви.

Мощность в начале линии ИП-1:

$$\begin{aligned} S'_{\text{ип-1}} &= S''_{\text{ип-1}} + \Delta S_{\text{ип-1}} = 150,7 + j64 + 3,68 + j13,4 = \\ &= 154,4 + j77,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Обратите внимание: мощность в начале линии больше, чем в конце линии, поэтому потери мощности прибавляют, двигаясь от конца линии к ее началу.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\Delta U_{\text{ип-1}} = \frac{P''_{\text{ип-1}} R_{\text{ип-1}} + Q''_{\text{ип-1}} X_{\text{ип-1}}}{U_1} = \frac{150,7 \cdot 6,37 + 64 \cdot 23,2}{215,3} = 11,4 \text{ кВ}.$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\delta U_{\text{ип-1}} = \frac{P''_{\text{ип-1}} X_{\text{ип-1}} - Q''_{\text{ип-1}} R_{\text{ип-1}}}{U_1} = \frac{150,7 \cdot 23,2 - 64 \cdot 6,37}{215,3} = 14,3 \text{ кВ}.$$

Обратите внимание на принцип: если в формуле фигурирует значение мощности в конце ветви, то в нее подставляется значение напряжения в конце ветви.

Напряжение на шинах источника питания:

$$\begin{aligned} U_{\text{ип}} &= \sqrt{(U_1 + \Delta U_{\text{ип-1}})^2 + (\delta U_{\text{ип-1}})^2} = \\ &= \sqrt{(215,3 + 11,4)^2 + (14,3)^2} = 227,2 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Обратите внимание: напряжение на шинах источника питания больше, чем напряжение на ПС1, поэтому продольную составляющую вектора падения напряжения прибавляют, двигаясь от конца линии к ее началу.

Половина зарядной мощности в начале линии:

$$\frac{Q'_{сип-1}}{2} = \frac{U_{ип}^2 B_{л}}{2} = \frac{227,2^2 \cdot 591,7 \cdot 10^{-6}}{2} = 15,3 \text{ Мвар.}$$

Мощность, выдаваемая источником питания в сеть:

$$S_{ип} = S'_{ип-1} - j \frac{Q'_{сип-1}}{2} = 154,4 + j77,4 - j15,3 = 154,4 + j62,1 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Обратите внимание: на основе первого закона Кирхгофа сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него.

Задача 3.2

От шин источника питания по двухцепной линии 110 кВ (параметры схемы замещения: $R_{ип-1} = 2,95 \text{ Ом}$, $X_{ип-1} = 10,0 \text{ Ом}$, $B_{ип-1} = 284,4 \cdot 10^{-6} \text{ См}$,) получает питание ПС1 (см. рис. 3.8). Мощность, выдаваемая источником питания в сеть $S_{ип} = 50 + j30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, напряжение на шинах источника питания $U_{ип} = 121 \text{ кВ}$. Определить напряжение на шинах ВН ПС1 (U_1), а также ее приведенную нагрузку ($S_{прив1}$).

Решение. Схема замещения сети с обозначением мощностей на участках сети приведена на рис. 3.9.

Половина зарядной мощности в начале линии:

$$\frac{Q'_{сип-1}}{2} = \frac{U_{ип}^2 B_{л}}{2} = \frac{121^2 \cdot 284,4 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,08 \text{ Мвар.}$$

Мощность в начале линии ИП-1:

$$S'_{ип-1} = S_{ип} + j \frac{Q'_{сип-1}}{2} = 50 + j30 + j2,08 = 50 + j32,1 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Обратите внимание: на основе первого закона Кирхгофа сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него.

Потери мощности в сопротивлении линии ИП-1:

$$\Delta S_{\text{ИП-1}} = \frac{(S'_{\text{ИП-1}})^2}{U_{\text{ИП}}^2} Z_{\text{ИП-1}} = \frac{50^2 + 32,1^2}{121^2} \cdot (2,95 + j10) = 0,711 + j2,41 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Обратите внимание на принцип: если в формуле фигурирует значение мощности в начале ветви, то в нее подставляется значение напряжения в начале ветви.

Мощность в конце линии ИП-1:

$$S''_{\text{ИП-1}} = S'_{\text{ИП-1}} - \Delta S_{\text{ИП-1}} = 50 + j32,1 - (0,711 + j2,41) = 49,3 + j29,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Обратите внимание: мощность в начале линии больше, чем в конце линии, поэтому потери мощности вычитают, двигаясь от начала линии к ее концу.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\Delta U_{\text{ИП-1}} = \frac{P'_{\text{ИП-1}} R_{\text{ИП-1}} + Q'_{\text{ИП-1}} X_{\text{ИП-1}}}{U_{\text{ИП}}} = \frac{50 \cdot 2,95 + 32,1 \cdot 10}{121} = 3,87 \text{ кВ}.$$

Обратите внимание: поскольку рассчитывается элемент сети с номинальным напряжением 110 кВ, то поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается.

Обратите внимание на принцип: если в формуле фигурирует значение мощности в начале ветви, то в нее подставляется значение напряжения в начале ветви.

Напряжение на шинах ВН ПС1:

$$U_1 = U_{\text{ИП}} - \Delta U_{\text{ИП-1}} = 121 - 3,87 = 117,1 \text{ кВ}.$$

Обратите внимание: напряжение на шинах источника питания больше, чем напряжение на шинах ПС1, поэтому продольную составляющую вектора падения напряжения вычитают, двигаясь от начала линии к ее концу.

Половина зарядной мощности в конце линии:

$$\frac{Q''_{\text{сип-1}}}{2} = \frac{U_1^2 B_{\text{л}}}{2} = \frac{117,1^2 \cdot 284,4 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,95 \text{ Мвар.}$$

Приведенная нагрузка ПС1:

$$S_{\text{прив1}} = S''_{\text{ип-1}} + j \frac{Q''_{\text{сип-1}}}{2} = 49,3 + j29,7 + j1,95 = 49,3 + j31,7 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Задача 3.3

По двухцепной электропередаче 110 кВ получают питание две подстанции, заданные расчетные нагрузки которых $S_{\text{p1}} = 25,4 + j12,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $S_{\text{p2}} = 20,2 + j10,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ (рис. 3.10). Параметры схемы замещения линии А1: $R_{\text{А1}} = 2,36 \text{ Ом}$, $X_{\text{А1}} = 8,02 \text{ Ом}$, $Q_{\text{сА1}} / 2 = 1,38 \text{ Мвар}$; линии 12: $R_{12} = 2,44 \text{ Ом}$, $X_{12} = 4,23 \text{ Ом}$. Напряжение на шинах источника питания составляет $U_{\text{А}} = 115 \text{ кВ}$. Рассчитать режим электропередачи, т.е. определить напряжение на шинах ВН ПС1 и ПС2 (U_1 и U_2), а также мощность, выдаваемую источником питания в сеть ($S_{\text{А}}$).

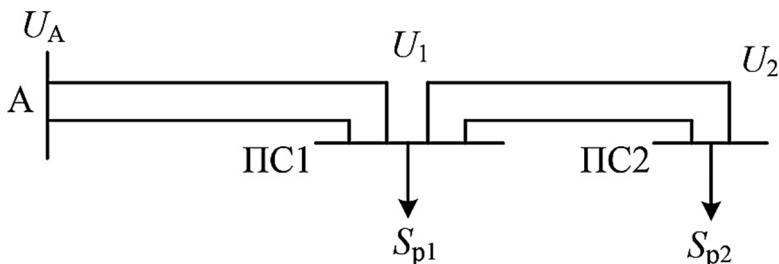


Рис. 3.10. Схема сети

Решение. Приведем расчетную схему сети, указав на ней мощности в ветвях (рис. 3.11).

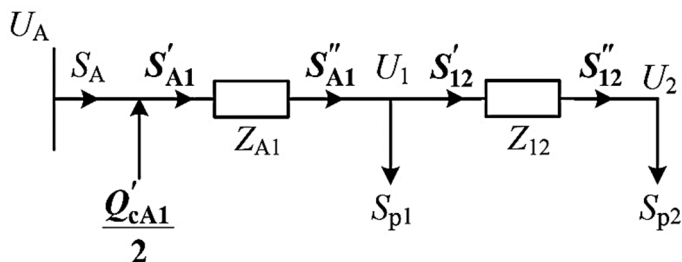


Рис. 3.11. Расчетная схема сети

Решить данную задачу прямыми методами (как две предыдущие задачи) невозможно: напряжение известно в узле источника питания, а нагрузки – в узлах 1 и 2. Поэтому при решении задач в данной постановке используется один шаг **итерационного метода**, получившего название метода расчета «в 2 этапа». На 1-м этапе осуществляют расчет потокораспределения при нулевых приближениях напряжений в узлах сети $U_i^{(0)}$. На 2-м этапе осуществляют расчет первых приближений напряжений в узлах $U_i^{(1)}$ по потокам мощности, определенным на первом этапе.

1-й этап. В качестве начального (нулевого) приближения принимаем, что $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = U_{ном} = 110$ кВ.

Мощность в конце линии 12:

$$S_{12}'' = S_{p2} = 20,2 + j10,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned} \Delta S_{12} &= \frac{(S_{12}'')^2}{U_{ном}^2} Z_{12} = \frac{20,2^2 + 10,3^2}{110^2} \cdot (2,44 + j4,23) = \\ &= 0,104 + j0,180 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Обратите внимание: на 1-м этапе потери мощности рассчитываются по нулевым приближениям напряжений в узлах сети, в качестве которых принято номинальное напряжение сети.

Мощность в начале линии 12:

$$\begin{aligned} S'_{12} &= S''_{12} + \Delta S_{12} = 20,2 + j10,3 + 0,104 + j0,18 = \\ &= 20,3 + j10,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в конце линии А1:

$$S''_{A1} = S'_{12} + S_{p1} = 20,3 + j10,5 + 25,4 + j12,7 = 45,7 + j23,2 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Обратите внимание: на основе первого закона Кирхгофа сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него.

Потери мощности в сопротивлении линии А1:

$$\begin{aligned} \Delta S_{A1} &= \frac{(S''_{A1})^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{A1} = \frac{45,7^2 + 23,2^2}{110^2} \cdot (2,36 + j8,02) = \\ &= 0,512 + j1,74 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии А1:

$$\begin{aligned} S'_{A1} &= S''_{A1} + \Delta S_{A1} = 45,7 + j23,2 + 0,512 + j1,74 = \\ &= 46,2 + j24,9 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность, выдаваемая источником питания в сеть:

$$S_A = S'_{A1} - j \frac{Q_{cA1}}{2} = 46,2 + j24,9 - j1,38 = 46,2 + j23,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

2-й этап. Определим напряжения U_1 и U_2 . Поскольку рассчитывается элемент сети с номинальным напряжением 110 кВ, то поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии А1:

$$\Delta U_{A1} = \frac{P'_{A1} R_{A1} + Q'_{A1} X_{A1}}{U_A} = \frac{46,2 \cdot 2,36 + 24,9 \cdot 8,02}{115} = 2,68 \text{ кВ.}$$

Обратите внимание: продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии А1 рассчитывается по мощности в начале ветви А1, а не по мощности, выдаваемой источником питания в сеть.

Напряжение на шинах ВН ПС1:

$$U_1 = U_{\text{ип}} - \Delta U_{\text{ип-1}} = 115 - 2,68 = 112,3 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии 12:

$$\Delta U_{12} = \frac{P'_{12} R_{12} + Q'_{12} X_{12}}{U_1} = \frac{20,3 \cdot 2,44 + 10,5 \cdot 4,23}{112,3} = 0,837 \text{ кВ.}$$

Обратите внимание: продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении второй линии 12 рассчитывается по напряжению в начале этой линии (U_1), а не по напряжению на шинах источника питания.

Напряжение на шинах ВН ПС2:

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12} = 112,3 - 0,837 = 111,5 \text{ кВ.}$$

4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСТЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ

К простым замкнутым электрическим сетям относят кольцевые сети и сети с двухсторонним питанием. Подходы к расчету режимов таких сетей абсолютно идентичны. Поэтому рассмотрим методику расчета на примере схемы кольцевой сети, приведенной на рис. 4.1, для наиболее распространенного случая постановки задачи расчета режима: известны напряжение на шинах источника питания U_A и нагрузки в узлах сети – S_{p1} , S_{p2} , S_{p3} (расчетные нагрузки). Полные продольные сопротивления схемы замещения линий электропередачи $A1$, 12 , 23 , $A3$ равны соответственно Z_{A1} , Z_{12} , Z_{23} , Z_{A3} .

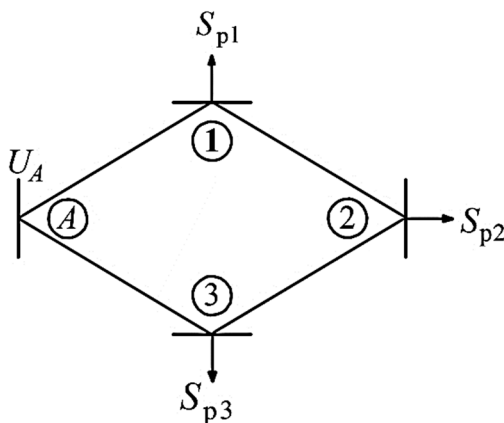


Рис. 4.1. Пример схемы кольцевой электрической сети

Основной подход к расчету режимов кольцевых сетей заключается в определении точки (узла схемы) потококораздела, по которой исходная кольцевая сеть размыкается на два разомкнутых радиально-магистральных участка, режим которых рассчитывается традиционным методом «в 2 этапа». Точка потококораздела – это такой узел сети, к которому мощность передается с двух сторон. Например, на рис. 4.2 точка потококораздела – это узел 1. В свою очередь точка потококораздела определяется по результатам расчета

предварительного потокораспределения мощностей, при выполнении которого пренебрегают потерями мощности в сопротивлениях линий.

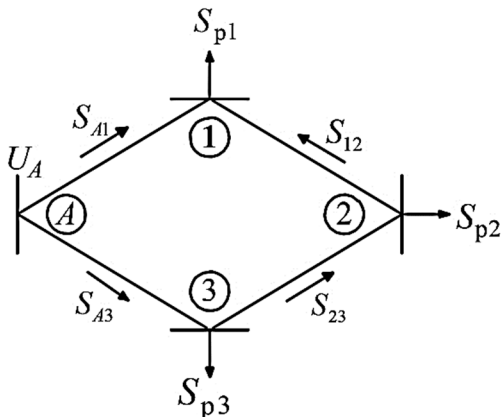


Рис. 4.2. К понятию точки потокоораздела в кольцевой сети

4.1. Вывод расчетных формул

Выведем формулы для определения предварительного (без учета потерь мощности) распределения мощностей в кольцевой сети $S_{ij}^{(0)}$. Для удобства зрительного восприятия разомкнем исходную кольцевую сеть по шинам источника питания A и представим в виде схемы с двухсторонним питанием (рис. 4.3). Поскольку половинки зарядных мощностей в линиях $A1$ и $A3$ не влияют на распределение мощностей по линиям сети, то их условно можно вынести к шинам источника питания.

Зададимся положительным направлением тока в линиях. Очевидно, что в линиях $A1$ и $A3$ направление тока – от источника питания к узлам 1 и 3 (мощность передается от источника питания к узлам нагрузки, а не наоборот). В двух оставшихся линиях положительное направление задается произвольно (это не влияет на ход рассуждений).

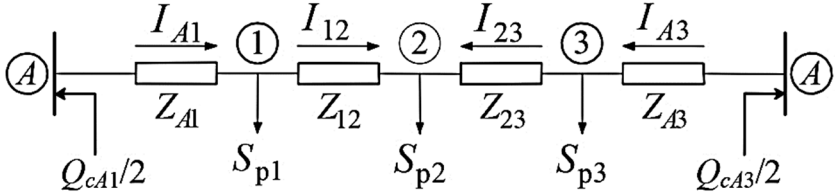


Рис. 4.3. Кольцевая сеть, разомкнутая по шинам источника питания А

Определим по второму закону Кирхгофа падение напряжения на участке А–1–2–3–А:

$$\sqrt{3} \cdot \dot{I}_{A1} \cdot \dot{Z}_{A1} + \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{12} \cdot \dot{Z}_{12} + \sqrt{3} \cdot (-\dot{I}_{23}) \cdot \dot{Z}_{23} + \sqrt{3} \cdot (-\dot{I}_{A3}) \cdot \dot{Z}_{A3}. \quad (4.1)$$

Начало и конец данного участка – это один и тот же узел сети А, тогда падение напряжения на этом участке равно нулю.

Расчеты режимов принято производить в форме мощностей, а не токов. Поэтому выразим токи в линиях через мощность, передающуюся по линиям. Примем допущение, что напряжения во всех узлах сети равны номинальному $U_{\text{ном}}$, и пренебрежем потерями мощности в сопротивлениях линий. Тогда:

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\hat{S}_{ij}^{(0)}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}. \quad (4.2)$$

Подставив (4.2) в (4.1) и приравняв (4.1) нулю получим первое уравнение для определения предварительного распределения мощностей в кольцевых сетях:

$$\frac{\hat{S}_{A1}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{A1}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} + \frac{\hat{S}_{12}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{12}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} - \frac{\hat{S}_{23}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{23}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} - \frac{\hat{S}_{A3}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{A3}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 0. \quad (4.3)$$

После сокращения на $\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}$:

$$\hat{S}_{A1}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{A1} + \hat{S}_{12}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{12} - \hat{S}_{23}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{23} - \hat{S}_{A3}^{(0)} \cdot \dot{Z}_{A3} = 0. \quad (4.3a)$$

Расчет режима осуществляется не в комплексно-сопряженных мощностях. Заменив в уравнении (4.3а) все величины на комплексно-сопряженные и «опустив» знак комплекса в обозначении мощностей, получим «классический» вид:

$$S_{A1}^{(0)} \cdot \hat{Z}_{A1} + S_{12}^{(0)} \cdot \hat{Z}_{12} - S_{23}^{(0)} \cdot \hat{Z}_{23} - S_{A3}^{(0)} \cdot \hat{Z}_{A3} = 0. \quad (4.3б)$$

Напомним, если полное сопротивление линии носит активно-индуктивный характер $Z = R + jX$, то комплексно-сопряженное сопротивление: $\hat{Z} = R - jX$.

В уравнении (4.3б) четыре неизвестных искомых мощности в линиях кольцевой сети. Запишем еще три уравнения на основе первого закона Кирхгофа для узлов 1, 2, 3 в форме мощностей:

$$\langle 1 \rangle: S_{A1}^{(0)} = S_{p1} + S_{12}^{(0)}; \quad (4.4)$$

$$\langle 2 \rangle: S_{12}^{(0)} + S_{23}^{(0)} = S_{p2}; \quad (4.5)$$

$$\langle 3 \rangle: S_{A3}^{(0)} = S_{23}^{(0)} + S_{p3}. \quad (4.6)$$

В уравнениях (4.4)–(4.6) последовательно выразим мощности на участках 12, 23 и A3 через мощность на участке A1 и известные (заданные) мощности нагрузки:

$$S_{12}^{(0)} = S_{A1}^{(0)} - S_{p1}; \quad (4.7)$$

$$S_{23}^{(0)} = S_{p2} - S_{12}^{(0)} = S_{p2} - (S_{A1}^{(0)} - S_{p1}) = S_{p1} + S_{p2} - S_{A1}^{(0)}; \quad (4.8)$$

$$S_{A3}^{(0)} = S_{p3} + S_{23}^{(0)} = S_{p3} + (S_{p1} + S_{p2} - S_{A1}^{(0)}) = S_{p1} + S_{p2} + S_{p3} - S_{A1}^{(0)}. \quad (4.9)$$

Подставив (4.7)–(4.9) в (4.3б):

$$\begin{aligned} S_{A1}^{(0)} \cdot \hat{Z}_{A1} + (S_{A1}^{(0)} - S_{p1}) \cdot \hat{Z}_{12} - (S_{p1} + S_{p2} - S_{A1}^{(0)}) \cdot \hat{Z}_{23} - \\ - (S_{p1} + S_{p2} + S_{p3} - S_{A1}^{(0)}) \cdot \hat{Z}_{A3} = 0. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Перегруппировав:

$$\begin{aligned} S_{A1}^{(0)} \cdot (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A'3}) = \\ = S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A'3}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A'3}) + S_{p3} \cdot (\hat{Z}_{A3}). \end{aligned} \quad (4.10a)$$

Выразим из (4.10a) мощность головного участка $A1$ кольцевой сети через известные мощности нагрузки в узлах сети и комплексно-сопряженные сопротивления линий кольцевой сети:

$$S_{A1}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A3}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A3}) + S_{p3} \cdot (\hat{Z}_{A3})}{(\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A3})} \quad (4.11)$$

Подставив (4.10) в (4.9) получим аналогичное выражение для второго головного участка кольцевой сети ($A3$)

$$S_{A3}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{A1}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12}) + S_{p3} \cdot (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23})}{(\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A3})}. \quad (4.12)$$

Для кольцевой сети, состоящей из произвольного числа линий, расчетные выражения (4.11) и (4.12) будут изменяться. Поэтому важно понять принцип формирования данных выражений для определения предварительного (без учета потерь мощности в линиях) распределения мощностей на головных участках (участках, отходящих от шин источника питания) кольцевых сетей:

- в знаменателе выражения стоит сумма комплексно-сопряженных сопротивлений всех участков рассматриваемой кольцевой сети;

- в числителе стоит сумма произведений нагрузки узлов сети и суммы комплексно-сопряженных сопротивлений участков сети от рассматриваемого узла до шин источника питания по пути, не содержащем рассчитываемый головной участок (рис. 4.4). Например, при определении мощности головного участка $A1$ $S_{A1}^{(0)}$

нагрузка узла 1 S_{p1} умножается на комплексно-сопряженное сопротивление участков кольцевой сети по пути 1–2–3–А $\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{23} + \hat{Z}_{A3}$, а не по пути 1–А $\hat{Z}_{A1}$, так как рассматриваемый путь не должен содержать рассчитываемый участок А–1.

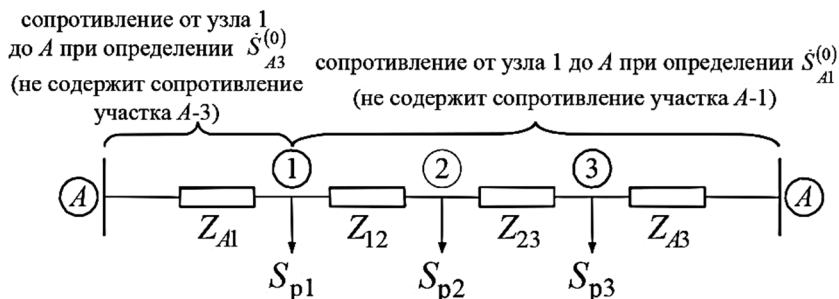


Рис. 4.4. Пояснение к формированию расчетных выражений для расчета режима кольцевой сети

В вычислительном плане выражения (4.11) и (4.12) могут быть упрощены при расчете режимов однородных кольцевых сетей. К однородным замкнутым электрическим сетям в первую очередь можно отнести электрические сети, выполненные проводами одной и той же марки с одинаковым среднегеометрическим расстоянием между фазами, т.е. имеющие одинаковые значения удельных активных и реактивных сопротивлений R_0 и X_0 на всех участках сети. В таких сетях расчет предварительного распределения мощностей на головных участках можно (удобнее) вычислять пропорционально длинам линий, а не комплексно-сопряженным сопротивлениям:

$$S_{A1}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (L_{12} + L_{23} + L_{A3}) + S_{p2} \cdot (L_{23} + L_{A3}) + S_{p3} \cdot (L_{A3})}{(L_{A1} + L_{12} + L_{23} + L_{A3})}. \quad (4.11a)$$

$$S_{A3}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (L_{A1}) + S_{p2} \cdot (L_{A1} + L_{12}) + S_{p3} \cdot (L_{A1} + L_{12} + L_{23})}{(L_{A1} + L_{12} + L_{23} + L_{A3})}. \quad (4.12a)$$

При выборе сечений проводов линий электропередачи (при проектировании) также первоначально принимают допущение о равенстве сечений на всех участках кольцевой сети.

Получив выражения для определения предварительных мощностей на головных участках и разобрав принцип их формирования для кольцевой сети с произвольным числом участков, перейдем к рассмотрению алгоритма определения точки потоко-раздела и разделения исходной замкнутой кольцевой сети на две разомкнутые (радиально-магистральные) части.

4.2. Алгоритм расчета режима кольцевых сетей

Рассмотрим алгоритм расчета режимов кольцевых сетей на примере сети, приведенной на рис. 4.5.

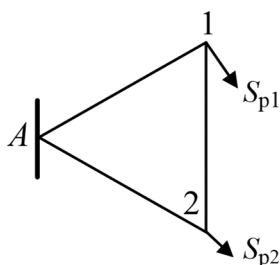


Рис. 4.5. Пример схемы кольцевой электрической сети

1. Размыкаем исходную кольцевую сеть по шинам источника питания A (рис. 4.6).

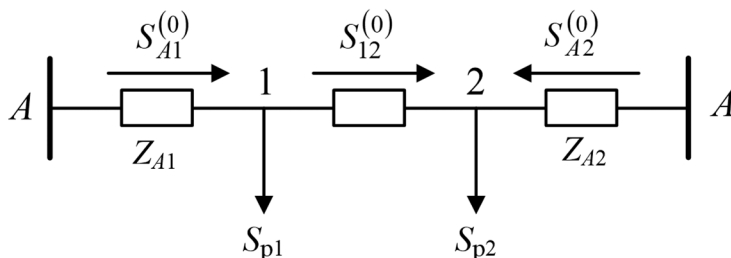


Рис. 4.6. Кольцевая сеть, разомкнутая по шинам источника питания A

2. Задаемся положительными направлениями мощностей на участках кольцевой сети. Направления мощностей головных участков $A1$ и $A3$ однозначно задаем от шин источника питания к узлам нагрузки (см. рис. 4.6). Направление мощностей на не головных участках задаем произвольно (для рассматриваемой сети для участка 1–2, например, слева направо от узла 1 к узлу 2, см. рис. 4.6).

3. Рассчитываем предварительные (без учета потерь мощности в линиях) мощности на головных участках сети по выражениям аналогичным (4.11) и (4.12):

$$S_{A1}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{A2})}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}},$$

$$S_{A2}^{(0)} = \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{A1}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12})}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}}.$$

4. Проверяем отсутствие арифметических ошибок через оценку выполнения баланса мощности: сумма мощностей головных участков должна равняться сумме всех нагрузок в узлах кольцевой сети:

$$S_{A1}^{(0)} + S_{A2}^{(0)} \equiv S_{p1} + S_{p2}.$$

Невыполнение баланса мощности однозначно свидетельствует о наличии ошибки в вычислениях мощностей на головных участках.

5. Определяем мощности на оставшихся участках кольцевой сети на основе первого закона Кирхгофа (в форме мощностей):

$$S_{12}^{(0)} = S_{A1}^{(0)} - S_{p1}.$$

6. По знаку результата вычислений мощностей на неголовных участках оцениваем, верно ли было первоначально задано направление мощностей на неголовных участках, и определяем точку потокораздела:

– если $P_{12}^{(0)} > 0$ и $Q_{12}^{(0)} > 0$, то первоначально заданное направление передачи мощности в линии 12 (рис. 4.7, а) слева направо от узла 1 к узлу 2 верное (рис. 4.7, б). К узлу 2 мощности передаются с двух сторон (и по линии 12 и по линии А2; в отличие от узла 1 – по линии А1 к узлу 1, по линии 12 от узла 1). Значит узел 2 точка потокораздела рассматриваемой кольцевой сети;

– если $P_{12}^{(0)} < 0$ и $Q_{12}^{(0)} < 0$, то первоначально заданное направление передачи мощности в линии 12 слева направо от узла 1 к узлу 2 неверное; мощность в линии 12 передается от узла 2 к узлу 1 (рис. 4.7, в). Следовательно, узел 1 точка потокораздела рассматриваемой кольцевой сети;

– если $P_{12}^{(0)} > 0$ и $Q_{12}^{(0)} < 0$, то точка потокораздела по активной и реактивной мощности не совпадает: по активной мощности точка потокораздела – узел 2, по реактивной мощности – узел 1 (рис. 4.7, г);

– если $P_{12}^{(0)} < 0$ и $Q_{12}^{(0)} > 0$, то точка потокораздела по активной и реактивной мощности не совпадает: по активной мощности точка потокораздела – узел 1, по реактивной мощности – узел 2 (рис. 4.7, д).

7а. В случае совпадения точки потокораздела по активной и реактивной мощности исходная кольцевая сеть (рис. 4.8, а) размыкается по точке потокораздела на два разомкнутых участка (рис. 4.8, б). При этом нагрузку узла, по которому размыкается сеть, разносят по двум образовавшимся схемам в соответствии с предварительным потокораспределением. Схемы рис. 4.8, а и рис. 4.8, б эквивалентны друг другу, поскольку $S_{12}^{(0)} + S_{A2}^{(0)} = S_{p2}$.

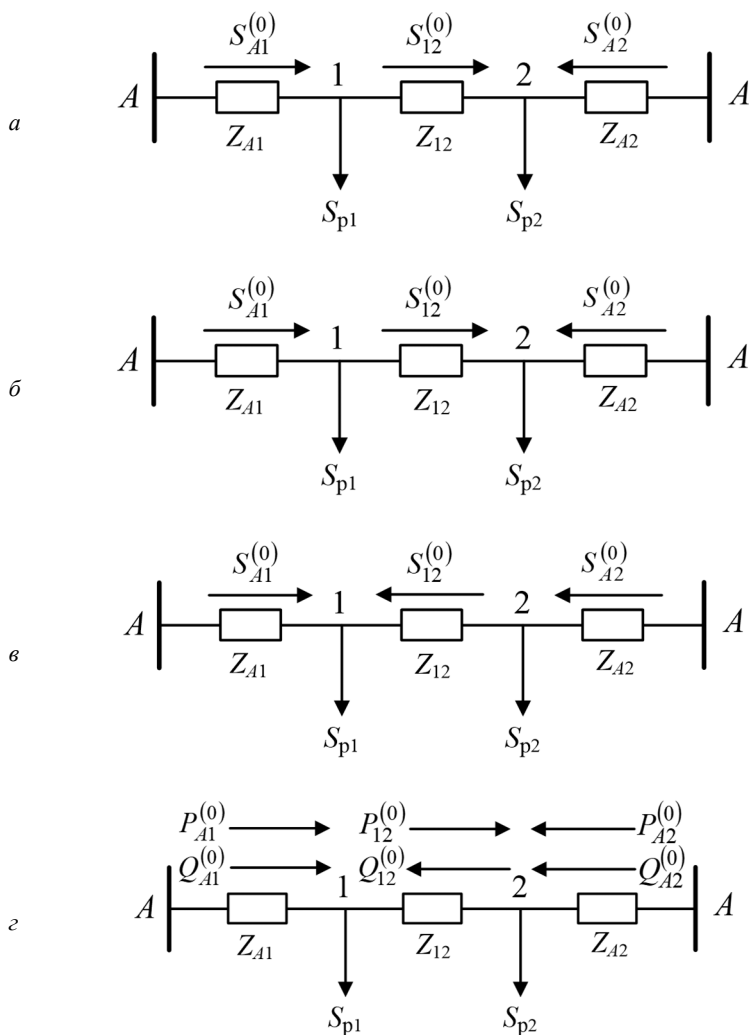


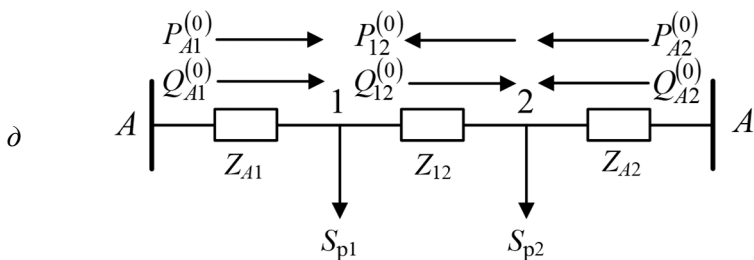
Рис. 4.7. Возможные варианты направления передачи мощности по линии 12:

а – первоначально заданное направление;

б – истинное направление для случая $P_{12}^{(0)} > 0$ и $Q_{12}^{(0)} > 0$;

в – истинное направление для случая $P_{12}^{(0)} < 0$ и $Q_{12}^{(0)} < 0$;

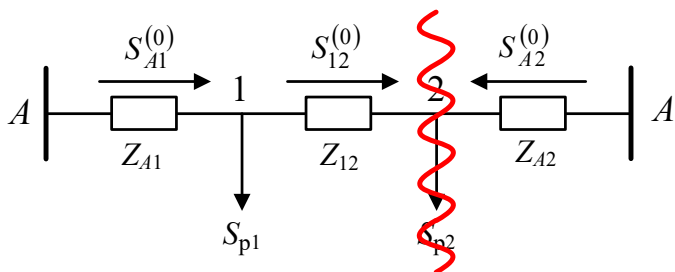
г – истинное направление для случая $P_{12}^{(0)} > 0$ и $Q_{12}^{(0)} < 0$;



Окончание рис. 4.7:

δ – истинное направление для случая $P_{12}^{(0)} < 0$ и $Q_{12}^{(0)} > 0$.

a



б

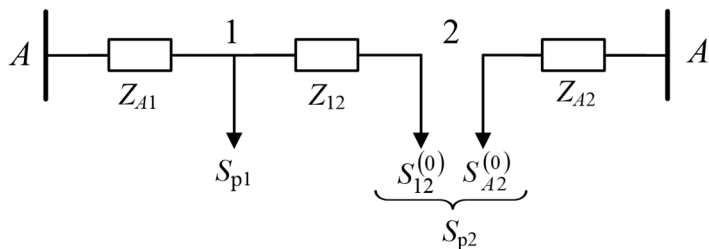


Рис. 4.8. Преобразование кольцевой схемы сети при совпадении точки потококораздела по активной и реактивной мощности:

a – исходная схема;

б – схема, разомкнутая по точке потококораздела

Дальнейший расчет режима кольцевой сети сводится к расчету режимов методом «в 2 этапа» двух разомкнутых радиально-магистральных сетей по рис. 4.8, б.

7б. В случае несовпадения точки потококораздела по активной и реактивной мощности исходная кольцевая сеть (рис. 4.9, а) размыкается по двум узлам (точкам потококораздела) с исключением линии между точками потококораздела (рис. 4.9, б). Следовательно, схема рис. 4.9, б не эквивалента исходной схеме рис. 4.9, а – в схеме рис. 4.9, б отсутствует линия 12. Исключенная из схемы сети линия 12 учитывается в нагрузках в схеме рис. 4.9, б значением потерь мощности в ней.

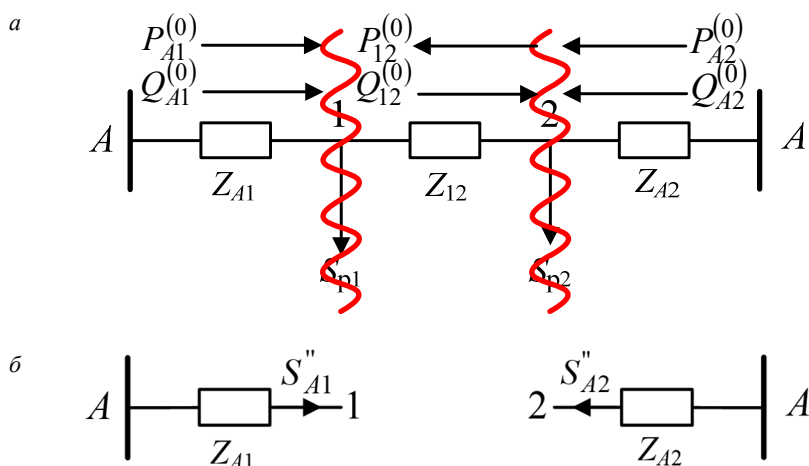


Рис. 4.9. Преобразование кольцевой схемы сети при несовпадении точки потококораздела по активной и реактивной мощности:

а – исходная схема; б – схема, разомкнутая по двум точкам потококораздела

Определим потери мощности в линии 12:

$$\Delta S_{12}^{(0)} = \frac{\left(P_{12}^{(0)}\right)^2 + \left(Q_{12}^{(0)}\right)^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{12},$$

и учтем их в мощностях, передающихся по линиям $A1$ и $A2$ к узлам 1 и 2 соответственно:

$$\begin{aligned} S_{A1}'' &= S_{A1}^{(0)} + j\Delta Q_{12}^{(0)}; \\ S_{A2}'' &= S_{A2}^{(0)} + \Delta P_{12}^{(0)}. \end{aligned}$$

В узле с точкой потокораздела по активной мощности прибавляются потери реактивной мощности в исключенной линии и наоборот.

Продemonстрируем это на примере узла 2 – точки потоко-раздела по реактивной мощности. Реактивная мощность, переда-ющаяся в узел 2 по линии $A2$, составляет $Q_{A2}^{(0)}$, по линии 12 – $Q_{12}^{(0)}$. Тогда реактивная мощность, передающаяся в узел 1 по линии $A1$, составит: $Q_{A1}'' = Q_{12}^{(0)} + \Delta Q_{12}^{(0)} + Q_{p1}$. Учитывая, что $Q_{A1}^{(0)} = Q_{12}^{(0)} + Q_{p1}$, получим: $Q_{A1}'' = Q_{A1}^{(0)} + \Delta Q_{12}^{(0)}$. Активная мощность, передающаяся в узел 1 по линии $A1$, составляет $P_{A1}^{(0)}$, по линии 12 – $P_{12}^{(0)}$. Объединив активную и реактивную мощность в полную, получим иско-мое выражение.

Дальнейший расчет режима кольцевой сети сводится к рас-чету режимов методом «в 2 этапа» двух разомкнутых радиально-магистральных сетей по рис. 4.9, б.

4.3. Особенности расчета режимов замкнутых сетей с двухсторонним питанием

Головные участки кольцевых сетей могут отходить от раз-ных секций шин одного источника питания (рис. 4.10) и в общем случае напряжение на секциях A и B различны: $U_A \neq U_B$ (по-скольку в сетях напряжением до 220 кВ включительно фазы напряжений в узлах практически одинаковы, то в практических расчетах используют только модуль напряжения). Аналогичная разница в напряжениях на шинах источников питания характерна и для сетей с двухсторонним питанием (рис. 4.11).

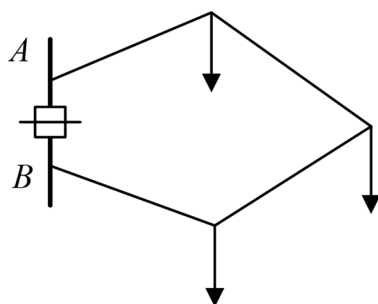


Рис. 4.10. Пример кольцевой сети, опирающейся на два источника питания

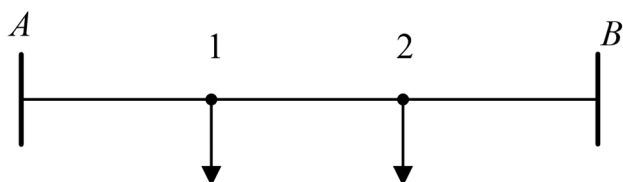


Рис. 4.11. Пример сети с двухсторонним питанием

В таких сетях от шин с бóльшим напряжением к шинам с меньшим напряжением будет протекать так называемый уравни- тельный ток

$$I_{\text{уп}} = \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3} \cdot (Z_{A1} + Z_{12} + Z_{B2})},$$

который накладывается во всех линиях на токи, определяемые нагрузками потребителей в узлах.

Режим в этом случае рассчитывают, воспользовавшись ме- тодом наложения. Отдельно проводят два расчета:

1) расчет режима при условии, что напряжения на шинах источников питания равны (отсутствие уравнительного тока), по алгоритму, изложенному в разделе 4.2;

2) расчет уравнильного тока и соответствующей ему уравнильной мощности при условии, что нагрузки в узлах сети отсутствуют, и допущении, что напряжения во всех узлах нагрузки равны номинальному:

$$S_{\text{ур}} = \sqrt{3} \cdot \hat{I}_{\text{ур}} \cdot U_{\text{ном}} = \frac{U_A - U_B}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{B2}} \cdot U_{\text{ном}}.$$

Результаты расчета двух этих режимов складываются (накладываются друг на друга) по каждой линии с учетом положительного направления мощностей.

4.4. Особенности послеаварийных режимов кольцевых сетей

В замкнутых сетях в отличие от разомкнутых возможно несколько различных послеаварийных режимов, связанных с отключением одной из линий. В качестве расчетного послеаварийного режима выбирают один – самый тяжелый режим для сети в целом, – отключение самого загруженного в нормальном режиме головного участка (головного участка с наибольшей передаваемой полной мощностью). Именно данный режим будет характеризоваться максимальными потерями мощности и падением напряжения. Кольцевая схема сети в этом режиме «превратится» в магистральную схему, режим которой рассчитывается традиционным методом «в 2 этапа».

Примеры решения задач

Задача 4.1

По однородной кольцевой сети 110 кВ (все участки сети выполнены проводами одного сечения с удельными параметрами $R_0 = 0,33$ Ом/км, $X_0 = 0,43$ Ом/км) получают питание три подстанции (рис. 4.12). Расчетные нагрузки подстанций в МВ·А и длины линий в км приведены на схеме сети. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_A = 118$ кВ. Рассчитать режим кольцевой сети.

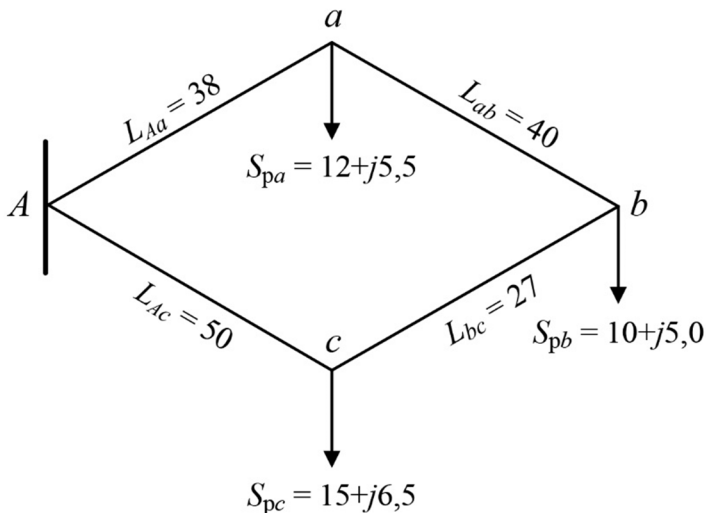


Рис. 4.12. Схема кольцевой сети

Решение. Разомкнем кольцевую сеть $A-a-b-c-A$ по шинам источника питания A и представим исходную кольцевую сеть в виде сети с двумя источниками питания A и A' (рис. 4.13).

Произвольно зададимся положительными направлениями мощностей в линиях сети (см. стрелки на рис. 4.13). Очевидно, что на головных участках $A-a$ и $A'-c$ положительное направление мощности всегда будет от шин источника питания в сеть, а на остальных участках реальное направление может не совпадать с предварительно принятым.

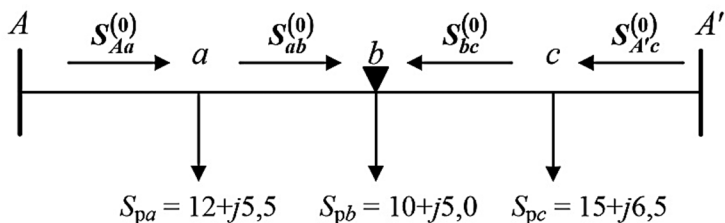


Рис. 4.13. Схема кольцевой сети разомкнутой по шинам источника питания

С целью выявления точек потокоораздела по активной и реактивной мощности предварительно рассчитаем потокооразделение в сети (без учета потерь мощности). Если кольцевая сеть выполняется проводами одного сечения, то предварительное потокооразделение определяется по длинам линий. Также поступают на этапе проектирования электрических сетей, когда сечения линий еще не выбраны.

Потоки мощности на головных участках сети:

$$S_{Aa}^{(0)} = \frac{S_{pa}(L_{ab} + L_{bc} + L_{Ac}) + S_{pb}(L_{bc} + L_{Ac}) + S_{pc}(L_{Ac})}{L_{Aa} + L_{ab} + L_{bc} + L_{Ac}} =$$

$$= \frac{(12 + j5,5) \cdot (40 + 27 + 50) + (10 + j5) \cdot (27 + 50) + (15 + j6,5) \cdot (50)}{38 + 40 + 27 + 50} =$$

$$= 18,9 + j8,73 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

$$S_{Ac}^{(0)} = \frac{S_{pa}(L_{Aa}) + S_{pb}(L_{Aa} + L_{ab}) + S_{pc}(L_{Aa} + L_{ab} + L_{bc})}{L_{Aa} + L_{ab} + L_{bc} + L_{Ac}} =$$

$$= \frac{(12 + j5,5) \cdot (38) + (10 + j5) \cdot (38 + 40) + (15 + j6,5) \cdot (38 + 40 + 27)}{38 + 40 + 27 + 50} =$$

$$= 18,1 + j8,27 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сделаем проверку вычислений мощностей на головных участках сети:

$$S_{Aa}^{(0)} + S_{Ac}^{(0)} = 18,9 + j8,73 + 18,1 + j8,27 = 37 + j17 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{pa} + S_{pb} + S_{pc} = 12 + j5,5 + 10 + j5 + 15 + j6,5 = 37 + j17 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Баланс мощности выполняется. Допускается различие в балансе мощности на две единицы в последнем знаке за счет погрешности округления результатов расчета.

Потоки мощности на оставшихся участках:

$$S_{ab}^{(0)} = S_{Aa}^{(0)} - S_{pa} = 18,9 + j8,73 - (12 + j5,5) = 6,9 + j3,23 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

$$S_{bc}^{(0)} = S_{Ac}^{(0)} - S_{pc} = 18,1 + j8,27 - (15 + j6,5) = 3,1 + j1,77 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Обратите внимание: на основе первого закона Кирхгофа сумма втекающих в узел мощностей равна сумме мощностей, вытекающих из него.

Полученные потоки мощности положительны, следовательно, предварительно выбранные направления мощностей верны.

Определим точку потоко раздела. К точке b мощность подтекает с двух сторон (см. рис. 4.13), т.е. она и является точкой потоко раздела. В общем случае, если в результате расчета получилось:

- $P_{ab}^{(0)} > 0, Q_{ab}^{(0)} > 0, P_{bc}^{(0)} < 0, Q_{bc}^{(0)} < 0$, то точка потоко раздела – точка c ;

- $P_{ab}^{(0)} < 0, Q_{ab}^{(0)} < 0, P_{bc}^{(0)} > 0, Q_{bc}^{(0)} > 0$, то точка потоко раздела – точка a ;

- $P_{ab}^{(0)} > 0, Q_{ab}^{(0)} > 0, P_{bc}^{(0)} < 0, Q_{bc}^{(0)} > 0$, то точка потоко раздела по активной мощности – точка c , по реактивной мощности – точка b .

Точка потоко раздела по активной мощности обозначается значком $\blacktriangledown$, по реактивной мощности – ∇ , в случае совпадения точек потоко раздела по активной и реактивной мощности точка потоко раздела обозначается одним значком $\blacktriangledown$.

Размыкаем кольцевую сеть на две радиально-магистральные по точке потоко раздела (рис. 4.14).

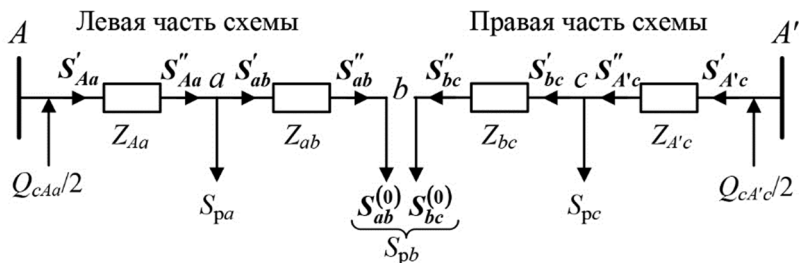


Рис. 4.14. Расчетная схема кольцевой сети, разомкнутой по точке потоко раздела

Обратите внимание: поскольку сеть разрезается по точке b , то часть нагрузки S_{pb} оказывается подключенной к линии ab – это мощность $S_{ab}^{(0)}$; другая часть нагрузки S_{pb} оказывается подключенной к линии bc – это мощность $S_{bc}^{(0)}$.

Левая часть схемы (рис. 4.14)

1-й этап. $U_a^{(0)} = U_b^{(0)} = U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$.

Мощность в конце линии ab :

$$S_{ab}'' = S_{ab}^{(0)} = 6,9 + j3,23 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии ab :

$$\begin{aligned} \Delta S_{ab} &= \frac{(S_{ab}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{ab} = \frac{6,9^2 + 3,23^2}{110^2} \cdot (0,33 + j0,43) \cdot 40 = \\ &= 0,063 + j0,083 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии ab :

$$\begin{aligned} S_{ab}' &= S_{ab}'' + \Delta S_{ab} = 6,9 + j3,23 + 0,063 + j0,083 = \\ &= 6,96 + j3,31 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в конце линии Aa :

$$S_{Aa}'' = S_{ab}' + S_{pa} = 6,96 + j3,31 + 12 + j5,5 = 19,0 + j8,81 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии Aa :

$$\begin{aligned} \Delta S_{Aa} &= \frac{(S_{Aa}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{Aa} = \frac{19,0^2 + 8,81^2}{110^2} \cdot (0,33 + j0,43) \cdot 38 = \\ &= 0,455 + j0,592 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии Aa :

$$S'_{Aa} = S''_{Aa} + \Delta S_{Aa} = 19,0 + j8,81 + 0,455 + j0,592 = 19,5 + j9,40 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

2-й этап. Определим напряжения U_a и $U_{бсл}$.

Поскольку рассчитывается элемент сети с номинальным напряжением 110 кВ, то поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии Aa :

$$\Delta U_{Aa} = \frac{P'_{Aa} R_{Aa} + Q'_{Aa} X_{Aa}}{U_A} = \frac{19,5 \cdot 0,33 \cdot 38 + 9,4 \cdot 0,43 \cdot 38}{118} = 3,37 \text{ кВ}.$$

Напряжение в точке a :

$$U_a = U_A - \Delta U_{Aa} = 118 - 3,37 = 114,6 \text{ кВ}.$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии ab :

$$\Delta U_{ab} = \frac{P'_{ab} R_{ab} + Q'_{ab} X_{ab}}{U_a} = \frac{6,9 \cdot 0,33 \cdot 40 + 3,31 \cdot 0,43 \cdot 40}{114,6} = 1,29 \text{ кВ}.$$

Напряжение в точке b , определенное слева:

$$U_{бсл} = U_a - \Delta U_{ab} = 114,6 - 1,29 = 113,3 \text{ кВ}.$$

Правая часть схемы (рис. 4.14)

1-й этап. $U_c^{(0)} = U_b^{(0)} = U_{ном} = 110 \text{ кВ}.$

Мощность в конце линии bc :

$$S''_{bc} = S_{bc}^{(0)} = 3,1 + j1,77 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии bc :

$$\Delta S_{bc} = \frac{(S_{bc}'')^2}{U_{ном}^2} Z_{bc} = \frac{3,1^2 + 1,77^2}{110^2} \cdot (0,33 + j0,43) \cdot 27 = \\ = 0,009 + j0,012 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в начале линии bc :

$$S_{bc}' = S_{bc}'' + \Delta S_{bc} = 3,1 + j1,77 + 0,009 + j0,012 = 3,1 + j1,78 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в конце линии $A'c$:

$$S_{A'c}'' = S_{bc}' + S_{pc} = 3,1 + j1,78 + 15 + j6,5 = 18,1 + j8,28 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии $A'c$:

$$\Delta S_{A'c} = \frac{(S_{A'c}'')^2}{U_{ном}^2} Z_{A'c} = \frac{18,1^2 + 8,28^2}{110^2} \cdot (0,33 + j0,43) \cdot 50 = \\ = 0,540 + j0,704 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в начале линии $A'c$:

$$S_{A'c}' = S_{A'c}'' + \Delta S_{A'c} = 18,1 + j8,28 + 0,540 + j0,704 = \\ = 18,6 + j8,98 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

2-й этап. Определим напряжение U_c и $U_{бсп}$.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии $A'c$:

$$\Delta U_{A'c} = \frac{P_{A'c}' R_{A'c} + Q_{A'c}' X_{A'c}}{U_A} = \frac{18,6 \cdot 0,33 \cdot 50 + 8,98 \cdot 0,43 \cdot 50}{118} = 4,24 \text{ кВ}.$$

Напряжение в точке c :

$$U_c = U_A - \Delta U_{A'c} = 118 - 4,24 = 113,8 \text{ кВ}.$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии bc :

$$\Delta U_{bc} = \frac{P'_{bc} R_{bc} + Q'_{bc} X_{bc}}{U_c} = \frac{3,1 \cdot 0,33 \cdot 27 + 1,78 \cdot 0,43 \cdot 27}{113,8} = 0,424 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке b , определенное справа:

$$U_{b\text{сп}} = U_c - \Delta U_{bc} = 113,8 - 0,424 = 113,4 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке b :

$$U_b = \frac{U_{b\text{сл}} + U_{b\text{сп}}}{2} = \frac{113,3 + 113,4}{2} = 113,4 \text{ кВ.}$$

Обратите внимание: напряжение в точке b можно определить как слева, так и справа, (что и сделано выше) поэтому для дальнейших расчетов значение напряжения U_b принимаем равным среднеарифметическому значений напряжений в точке b , найденных слева и справа. Совпадение напряжений в точке b , найденных слева и справа, принципиально невозможно, так как выполнен только первый шаг итерационного процесса. На последующих итерациях степень несовпадения напряжений в точке b , найденных слева и справа, будет уменьшаться.

Если бы стояла задача расчета послеаварийного режима рассматриваемой сети, то в качестве расчетного режима необходимо было рассмотреть режим отключения головного участка Aa , так как

$$S'_{Aa} = 19,5 + j9,40 \text{ МВ} \cdot \text{А} > S'_{A'c} = 18,6 + j8,98 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Задача 4.2

По кольцевой сети 220 кВ получают питание две подстанции (рис. 4.15). Их расчетные нагрузки в МВ·А, длины линий в км и их марки проводов приведены на схеме сети. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_A = 246 \text{ кВ}$. Рассчитать режим кольцевой сети.

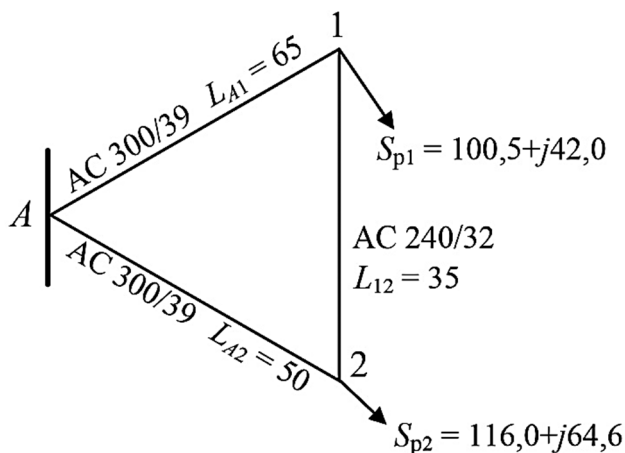


Рис. 4.15. Схема кольцевой сети

Параметры схемы замещения линий кольцевой сети:

- $R_{A1} = 6,24 \text{ Ом}; X_{A1} = 27,6 \text{ Ом}; \frac{Q'_{cA1}}{2} = 4,23 \text{ Мвар};$
- $R_{A'2} = 4,8 \text{ Ом}; X_{A'2} = 21,2 \text{ Ом}; \frac{Q'_{cA'2}}{2} = 3,25 \text{ Мвар}.$
- $R_{12} = 4,13 \text{ Ом}; X_{12} = 15,1 \text{ Ом}.$

Решение. Разомкнем кольцевую сеть $A-1-2-A$ по шинам источника питания A и представим исходную кольцевую сеть как сеть с двумя источниками питания A и A' (рис. 4.16).

Произвольно зададимся положительными направлениями мощностей в линиях сети (см. стрелки на рис. 4.16).

Предварительно рассчитаем потокораспределение в сети (без учета потерь мощности) с целью выявления точек потокораздела. В общем случае расчет предварительного потокораспределения осуществляется по полным сопротивлениям линий.

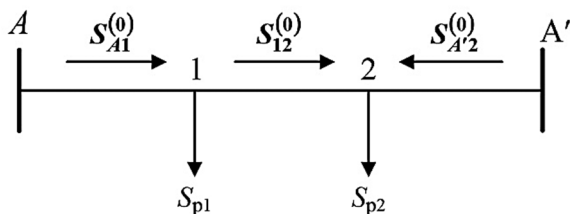


Рис. 4.16. Схема кольцевой сети разомкнутой по шинам источника питания

Потоки мощности на головных участках сети (A-1 и A'-2):

$$\begin{aligned}
 S_{A1}^{(0)} &= \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{A2})}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} = \\
 &= \frac{(100,5 + j42,0) \cdot (4,13 - j15,1 + 4,8 - j21,2) + (116,0 + j64,6) \cdot (4,8 - j21,2)}{6,24 - j27,6 + 4,13 - j15,1 + 4,8 - j21,2} = \\
 &= 120,9 + j61,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \\
 S_{A'2}^{(0)} &= \frac{S_{p1} \cdot (\hat{Z}_{A1}) + S_{p2} \cdot (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12})}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} = \\
 &= \frac{(100,5 + j42,0) \cdot (6,24 - j27,6) + (116,0 + j64,6) \cdot (6,24 - j27,6 + 4,13 - j15,1)}{6,24 - j27,6 + 4,13 - j15,1 + 4,8 - j21,2} = \\
 &= 120,9 + j61,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.
 \end{aligned}$$

Обратите внимание: $\hat{Z}$ – это комплексно-сопряженное сопротивление: $\hat{Z} = R - jX$ ($Z = R + jX$).

Сделаем проверку вычислений мощностей на головных участках сети:

$$S_{A1}^{(0)} + S_{A'2}^{(0)} = 95,6 + j45,3 + 120,9 + j61,3 = 216,5 + j106,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

$$S_{p1} + S_{p2} = 100,5 + j42,0 + 116,0 + j64,6 = 216,5 + j106,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Баланс мощности выполняется.

Поток мощности на участке 1–2:

$$\begin{aligned}
 S_{12}^{(0)} &= S_{A1}^{(0)} - S_{p1} = 95,6 + j45,3 - (100,5 + j42,0) = \\
 &= -4,9 + j3,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.
 \end{aligned}$$

В результате расчета получили, что действительная часть мощности $S_{12}^{(0)}$ отрицательная, а мнимая часть – положительная, следовательно, предварительно выбранное направление активной мощности в линии 1–2 неверное, а реактивной мощности – верное, т. е. получаем (рис. 4.17):

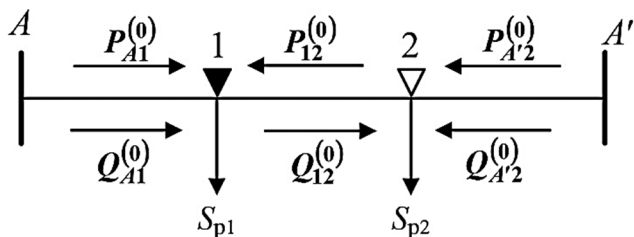


Рис. 4.17. Истинное направление потоков мощностей

Определим точки потокоораздела (см. рис. 4.17). К точке 1 активная мощность подтекает с двух сторон, т. е. она является точкой потокоораздела по активной мощности. К точке 2 реактивная мощность также подтекает с двух сторон, т. е. она является точкой потокоораздела по реактивной мощности.

Разрезаем кольцевую сеть на две радиально-магистральные по линии между точками потокоораздела (рис. 4.18).

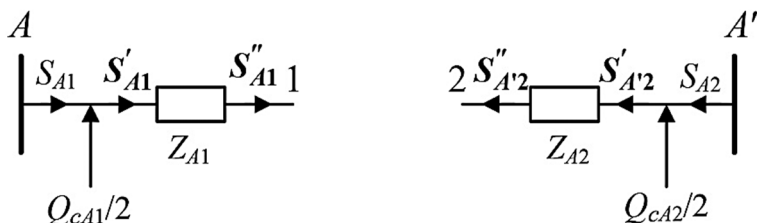


Рис. 4.18. Расчетная схема кольцевой сети, разомкнутой по линии между точками потокоораздела

Перейти к расчету режима по схеме, изображенной на рис. 4.18, пока невозможно, так как еще не определены мощности S'_{A1} и $S''_{A'2}$.

Так как узел 1 – точка потококораздела по активной мощности, то $P_{A1}'' = P_{A1}^{(0)} = 95,6$ МВт, а $P_{A'2}'' = P_{p2} + (P_{12}^{(0)} + \Delta P_{12}) = P_{A'2}^{(0)} + \Delta P_{12}$; так как узел 2 – точка потококораздела по реактивной мощности, то $Q_{A'2}'' = Q_{A'2}^{(0)} = 61,3$ Мвар, а $Q_{A1}'' = Q_{p1} + (Q_{12}^{(0)} + \Delta Q_{12}) = Q_{A1}^{(0)} + \Delta Q_{12}$.

Определим потери мощности в линии 12:

$$\begin{aligned}\Delta S_{12} &= \frac{(S_{12}^{(0)})^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{12} = \frac{4,9^2 + 3,3^2}{220^2} \cdot (4,13 + j15,1) = \\ &= 0,003 + j0,011 \text{ МВ} \cdot \text{А}.\end{aligned}$$

Теперь определим недостающие мощности $P_{A'2}''$ и Q_{A1}'' :

$$P_{A'2}'' = P_{A'2}^{(0)} + \Delta P_{12} = 120,9 + 0,003 = 120,9 \text{ МВт};$$

$$Q_{A1}'' = Q_{A1}^{(0)} + \Delta Q_{12} = 45,3 + 0,011 = 45,4 \text{ Мвар}.$$

На этом расчет предварительного этапа закончен и можно перейти к расчетам потококораспределений в обеих частях схемы рис. 4.18.

1-й этап. $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = U_{\text{ном}} = 220$ кВ.

Мощность в конце линии A1:

$$S_{A1}'' = 95,6 + j45,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии A1:

$$\begin{aligned}\Delta S_{A1} &= \frac{(S_{A1}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{A1} = \frac{95,6^2 + 45,4^2}{220^2} \cdot (6,24 + j27,6) = \\ &= 1,44 + j6,39 \text{ МВ} \cdot \text{А}.\end{aligned}$$

Мощность в начале линии A1:

$$\begin{aligned}S_{A1}' &= S_{A1}'' + \Delta S_{A1} = 95,6 + j45,4 + 1,44 + j6,39 = \\ &= 97,0 + j51,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.\end{aligned}$$

Мощность в конце линии $A'2$:

$$S_{A'2}'' = 120,9 + j61,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии $A'2$:

$$\begin{aligned} \Delta S_{A'2} &= \frac{(S_{A2}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{A'2} = \frac{120,9^2 + 61,3^2}{220^2} \cdot (4,8 + j21,2) = \\ &= 1,82 + j8,05 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии $A'2$:

$$\begin{aligned} S_{A'2}' &= S_{A'2}'' + \Delta S_{A'2} = 120,9 + j61,3 + 1,82 + j8,05 = \\ &= 122,7 + j69,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность, выдаваемая источником питания в сеть:

$$\begin{aligned} S_A &= S_{A1}' + S_{A'2}' - j \left(\frac{Q_{cA1}'}{2} + \frac{Q_{cA'2}'}{2} \right) = \\ &= 97,0 + j51,8 + 122,7 + j69,4 - j(4,23 + 3,25) = \\ &= 219,7 + j113,7 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Обратите внимание: зарядные мощности линий, отходящих от узла с известным напряжением (в данном случае от источника питания) рассчитываются не по номинальному напряжению, а по фактическому.

2-й этап. Определим напряжения U_1 и U_2 .

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии $A1$:

$$\Delta U_{A1} = \frac{P_{A1}' R_{A1} + Q_{A1}' X_{A1}}{U_A} = \frac{97 \cdot 6,24 + 51,8 \cdot 27,6}{246} = 8,27 \text{ кВ}.$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии $A1$:

$$\delta U_{A1} = \frac{P'_{A1} X_{A1} - Q'_{A1} R_{A1}}{U_A} = \frac{97 \cdot 27,6 - 51,8 \cdot 6,24}{246} = 9,57 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке 1:

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_A - \Delta U_{A1})^2 + (\delta U_{A1})^2} = \\ &= \sqrt{(246 - 8,27)^2 + (9,57)^2} = 237,9 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии $A'2$:

$$\Delta U_{A'2} = \frac{P'_{A'2} R_{A'2} + Q'_{A'2} X_{A'2}}{U_A} = \frac{122,7 \cdot 4,8 + 69,4 \cdot 21,2}{246} = 8,37 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии $A'2$:

$$\delta U_{A'2} = \frac{P'_{A'2} X_{A'2} - Q'_{A'2} R_{A'2}}{U_A} = \frac{122,7 \cdot 21,2 - 69,4 \cdot 4,8}{246} = 9,22 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке 2:

$$\begin{aligned} U_2 &= \sqrt{(U_A - \Delta U_{A'2})^2 + (\delta U_{A'2})^2} = \\ &= \sqrt{(246 - 8,37)^2 + (9,22)^2} = 237,8 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ВАРИАЦИЯХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

5.1. Совместный расчет режимов сетей нескольких номинальных напряжений

Реальные электрические сети состоят из участков разных номинальных напряжений, связанных между собой через трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы (пример схемы приведен на рис. 5.1). Расчет таких сетей принципиально не отличается от сетей одного номинального напряжения. В зависимости от исходных данных будет применяться либо прямой метод по данным конца или начала передачи, либо итерационный метод «в 2 этапа».

При совместном расчете установившихся режимов сетей нескольких классов напряжений не принято приводить сеть к одному базисному напряжению, как это распространено при расчете, например, токов короткого замыкания. Расчет установившихся режимов производят с учетом идеальных трансформаторов. В идеальном трансформаторе нет потерь, поэтому при переходе через идеальный трансформатор мощность до идеального трансформатора равняется мощности после, а напряжение отличается в коэффициент трансформации (k_T) раз.

Рассмотрим эти особенности на примере алгоритма расчета электрической сети, приведенной на рис. 5.1.

Сеть двух (и более) номинальных напряжений состоит из сети *меньшего* номинального напряжения ($U_{ном1}$) и *большого* номинального напряжения ($U_{ном2}$), связанных между собой через понижающие автотрансформаторы (или трансформаторы). Алгоритм расчета режима работы таких сетей при заданных мощностях нагрузок подстанций и напряжении на шинах источника питания следующий.

1. Определение приведенных и расчетных нагрузок подстанций в сетях обоих номинальных напряжений, за исключением подстанции с автотрансформаторами, связывающей сети двух номинальных напряжений между собой.

2. Расчет первого этапа метода «в 2 этапа» сети $U_{ном1}$. В результате определяется нагрузка на шинах среднего напряжения подстанции с автотрансформаторами.

3. Расчет первого этапа метода «в 2 этапа» автотрансформаторов. В результате определяется приведенная и расчетная нагрузки подстанции с автотрансформаторами.

4. Расчет первого этапа метода «в 2 этапа» сети $U_{ном2}$. Завершается расчет первого этапа определением мощности, отпускаемой с шин источника питания в рассматриваемую сеть.

5. Расчет второго этапа метода «в 2 этапа» сети $U_{ном2}$.

6. Расчет второго этапа метода «в 2 этапа» автотрансформаторов.

7. Регулирование напряжения на шинах среднего напряжения подстанции с автотрансформаторами, питающих сеть $U_{ном1}$ (переход через идеальный трансформатор в схеме замещения автотрансформаторов).

8. Расчет второго этапа метода «в 2 этапа» в сети $U_{ном1}$.

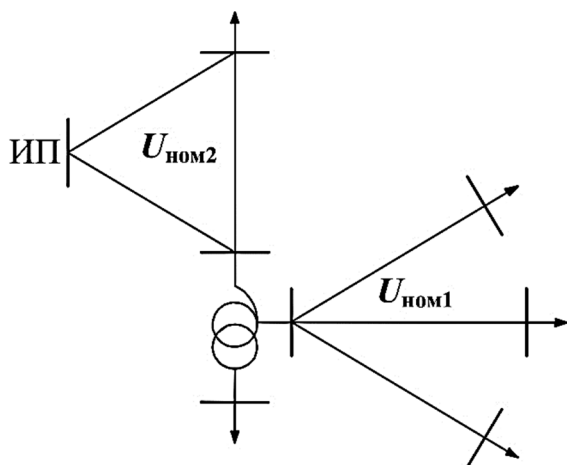


Рис. 5.1. Схема электрической сети двух номинальных напряжений $U_{ном1}$ и $U_{ном2}$

Таким образом, принципиальным отличием при расчете режимов сетей нескольких номинальных напряжений является переход через идеальные трансформаторы на втором этапе метода «в 2 этапа».

5.2. Расчет режимов при задании нагрузок статическими характеристиками нагрузки

Рассмотрим расчет режима электрической сети при задании нагрузок статическими характеристиками нагрузки на примере магистральной сети, схема которой приведена на рис. 3.1. Исходными данными являются: напряжение на шинах источника питания U_0 ; приведенные нагрузки в узлах 1 и 2 при номинальном напряжении в узлах $S_{1ном}$ и $S_{2ном}$; статические характеристики нагрузки в виде полиномов: $P_1 = f(U_1)$; $Q_1 = f(U_1)$; $P_2 = f(U_2)$; $Q_2 = f(U_2)$; параметры схемы замещения линий 01 и 12. Схема замещения электрической сети приведена на рис. 5.2.

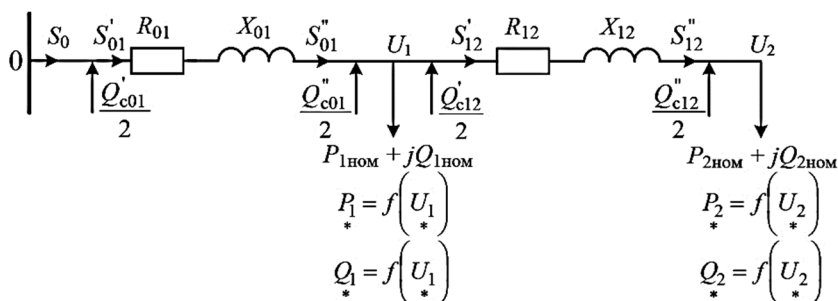


Рис. 5.2. Схема замещения электрической сети

При использовании метода «в 2 этапа» для решения задачи расчета режима в такой постановке нельзя ограничиваться только одной итерацией. По результатам первой итерации значения напряжений в узлах сети будут уточнены относительно начального приближения (номинального напряжения). По уточненным значениям напряжений в узлах необходимо пересчитать в соответствии со статическими характеристиками нагрузки в узлах и по этим значениям выполнять расчет на второй итерации. В итоге результаты расчета режима на первой и второй итерациях будут

существенно различаться. Даже для необъемных схем электрических сетей в несколько узлов может потребоваться выполнение 4–5 итераций для достижения заданной точности расчета.

Альтернативой методу «в 2 этапа» при задании нагрузок статическими характеристиками нагрузки является метод систематизированного подбора, который гарантировано позволяет определить напряжения в узлах за 3 итерации.

На первой итерации задаются значением напряжения в узле 2 $U_2^{(1)}$ заведомо большим, чем оно может быть (при условии, что напряжение на шинах источника питания равно U_0). Значение $U_2^{(1)}$ задается равным напряжению U_0 (очевидно, что с учетом падения напряжения на сопротивлениях линий 01 и 12 фактическое значение напряжения в узле 2 U_2 будет заведомо меньше чем U_0). После того как было задано значение напряжения в узле 2, расчет режима практически полностью сводится к классическому расчету по данным конца передачи. Небольшое отличие в расчете заключается в учете статических характеристик нагрузок – определение фактической мощности в узлах нагрузки по принятому значению напряжения. По значению напряжения $U_2^{(1)}$ определяется от-

носительная мощность нагрузки в узле 2: $P_2^*(U_2^{(1)}) = f\left(\frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}}\right)$;

$Q_2^*(U_2^{(1)}) = f\left(\frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}}\right)$, которая при домножении на значение нагрузки

при номинальном напряжении позволит определить фактическую мощность нагрузки в узле 2 при значении напряжения $U_2^{(1)}$:

$P_2^{(1)} = P_{2\text{ ном}} \cdot P_2^*(U_2^{(1)})$; $Q_2^{(1)} = Q_{2\text{ ном}} \cdot Q_2^*(U_2^{(1)})$. Определив значение

напряжения в узле 1 $U_1^{(1)}$, аналогично рассчитывают фактическую нагрузку в узле 1 при значении напряжения $U_1^{(1)}$ – $P_1^{(1)}$ и $Q_1^{(1)}$. Заканчивается расчет определением напряжения на шинах источника питания $U_0^{(1)}$ при условии, что в узле 2 значение напряжения $U_2^{(1)}$.

На второй итерации значение напряжения в узле 2 $U_2^{(2)}$ задается заведомо меньшим, чем оно может быть. Выполняется расчет аналогичный первой итерации. В результате расчета определяются значения напряжений в узлах 0 и 1 $U_0^{(2)}$ и $U_1^{(2)}$ при условии, что в узле 2 значение напряжения $U_2^{(2)}$.

Если полученное значение напряжения на шинах источника питания на второй итерации $U_0^{(2)}$ оказалось больше заданного U_0 , то на третьей итерации напряжение в узле 2 $U_2^{(3)}$ необходимо принять еще меньшим, чем на второй итерации; если $U_0^{(2)} < U_0$, то $U_2^{(2)} < U_2^{(3)} < U_2^{(1)}$. По результатам расчета третьей итерации получают значения $U_0^{(3)}$ и $U_1^{(3)}$.

По результатам расчетов трех итераций строят зависимости значений напряжения U_0 и U_1 от значения напряжения U_2 (рис. 5.3).

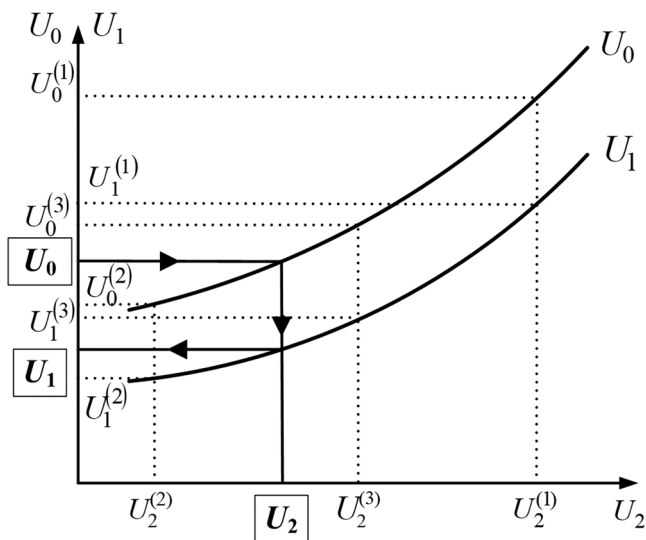


Рис. 5.3. Зависимость напряжений в узлах 0 и 1 от напряжения в узле 2

Используя зависимость $U_0 = f(U_2)$ по заданному в исходных данных значению U_0 , определяют фактическое значение напряжения U_2 . Далее по зависимости $U_1 = f(U_2)$ по фактическому значению напряжения U_2 определяют фактическое значение напряжения U_1 .

Метод систематизированного подбора может быть применен и для решения задачи расчета режима в случае задания нагрузки неизменной мощностью. Для решения данным методом требуется выполнение трех итераций, а методом «в 2 этапа» всего одной. По этой причине метод систематизированного подбора нецелесообразно применять для расчета режимов при задании нагрузки неизменной мощностью.

5.3. Особенности расчета режимов электрических сетей номинальным напряжением до 20 кВ

Электрические сети напряжением 6–20 кВ обычно очень разветвленные и состоят из большого числа участков. Расчет режима таких сетей по алгоритмам, изложенным в разделе 3.3, затруднителен. Вместе с тем расчеты сетей напряжением до 1000 В и 6–20 кВ можно значительно упростить, введя ряд допущений, которые практически не увеличивают погрешности результатов расчета.

1. Потери холостого хода в трансформаторах 6–20/0,4 кВ значительно меньше передаваемых через них мощностей. Поэтому при расчете параметров режима ими можно пренебречь. А учитывая, что зарядной мощностью воздушных линий номинальным напряжением до 35 кВ пренебрегают (см. раздел 1.1), то при расчете установившихся режимов сетей до 1000 В и 6–20 кВ полностью пренебрегают поперечными ветвями схем замещения линий и трансформаторов (т.е. пренебрегают и зарядными мощностями, и потерями холостого хода).

2. Каждый участок таких сетей имеет малую протяженность, а значит, и малое сопротивление. Следовательно, потери мощности в сопротивлениях проводов и обмоток трансформаторов оказываются несоизмеримо малыми в сравнении с передаваемыми

мыми мощностями. Поэтому при расчете мощностей по участкам потери мощности не учитывают. То есть мощность, передаваемая по участку, определяется как сумма нагрузок узлов, получающих питание через этот участок.

Но при расчете технико-экономических показателей учитываются как потери мощности на каждом участке, так и потери холостого хода.

3. В сетях номинальным напряжением до 110 кВ поперечной составляющей вектора падения напряжения пренебрегают (см. раздел 2.3). Поэтому расчет напряжений сводится к расчету потерь напряжения, которые принимаются численно равными продольной составляющей вектора падения напряжения. Но учитывая малое сопротивление каждого участка сети, потери напряжения на каждом участке небольшие и напряжения в узлах незначительно (в сравнении с сетями 110–220 кВ) отличаются от номинального. Поэтому расчет потерь напряжения ведут не по фактическим напряжениям в узлах, а по номинальным.

Продемонстрируем эти допущения на примере схемы сети, приведенной на рис. 5.4.

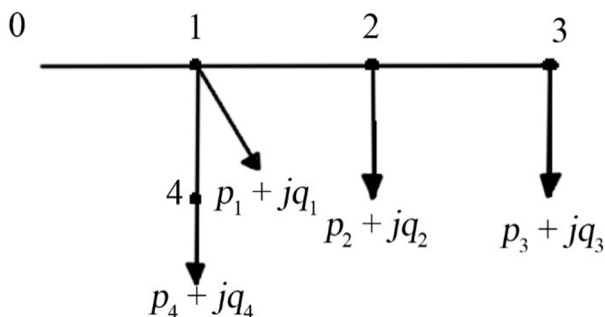


Рис. 5.4. Схема сети 6–20 кВ

Например, мощность, передаваемая по участку 12, будет равна:

$$S_{12} = p_2 + jq_2 + p_3 + jq_3,$$

потери напряжения на участке 12:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}R_{12} + Q_{12}X_{12}}{U_{\text{ном}}},$$

напряжение в узле 2:

$$U_2 = U_0 - \Delta U_{01} - \Delta U_{12}.$$

5.4. Расчет режимов электрических сетей с двумя источниками питания

В предыдущих разделах были рассмотрены электрические сети, которые осуществляют передачу и распределение электроэнергии от шин источника питания (как правило, крупной подстанции электроэнергетической системы) до конечных потребителей. В данном разделе рассмотрены на простейшем примере системообразующие электрические сети, которые напрямую не связаны с конечным потребителем. Примером таких сетей могут быть системообразующие линии, связывающие между собой две крупные узловые подстанции одной или двух энергосистем, или электропередачи, по которым осуществляется выдача мощности с шин электростанции в электроэнергетическую систему.

Особенностью установившихся режимов этих сетей является обеспечение (поддержание) фиксированного уровня напряжения на шинах электростанций и подстанций и заданный переток активной мощности в соответствии с диспетчерским графиком. Поэтому исходными данными для расчета режима являются напряжения по концам линии (на приемном и передающем конце) и передаваемая активная мощность.

Неизменность напряжений на шинах подстанций условно можно представить как подключение генераторов к этим шинам. Например, схему выдачи мощности с шин электростанций в приемную электроэнергетическую систему (рис. 5.5, а) можно представить в виде рис. 5.5, б. При таком представлении исходной схемы сложность связи узлов 1 и 2 не играет никакой роли для решения задачи расчета установившегося режима – это может быть одна или несколько линий, выполненных по радиальным, магистральным или кольцевым схемам.

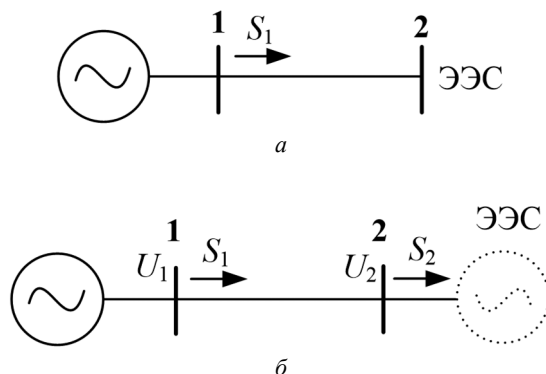


Рис. 5.5. Схема электропередачи (а) и ее условное моделирование (б)

Рассмотрим принципы решения задач расчета режима в такой постановке на примере схемы выдачи мощности с шин электростанции (ЭС) в приемную электроэнергетическую систему (ЭЭС) с отбором мощности на промежуточной подстанции (ПС) (рис. 5.6). Известны напряжения на приемном и передающем конце электропередачи U_1 , U_2 , активная мощность P_1 , выдаваемая с шин электростанций, мощность в узле нагрузки S_3 , и параметры схем замещения линий электропередачи Л1 и Л2 и трансформаторов понижающей подстанции.

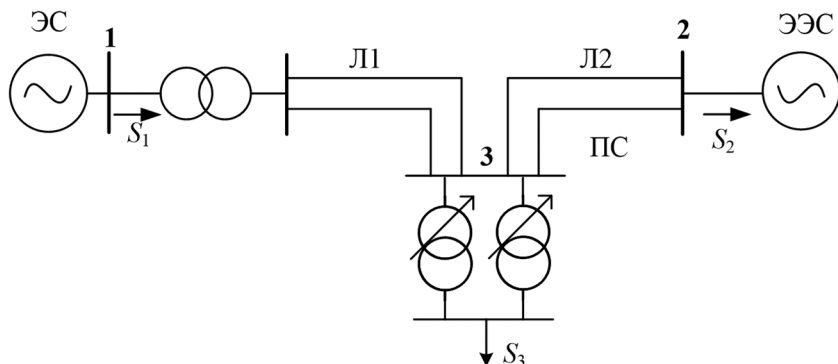


Рис. 5.6. Схема электропередачи

Для упрощения преобразований пренебрежем емкостными проводимостями линий, что не окажет влияние на результат.

Представим схему замещения рассматриваемой электрической сети (рис. 5.7) в виде электрической цепи, заменив заданные напряжения в узлах 1 и 2 источниками ЭДС (рис. 5.8, а). Нагрузку в узле 3 для удобства выполнения преобразований представим в виде неизменного активного и реактивного сопротивления (см. раздел 1.3), соединенных последовательно:

$$Z_n = \frac{U_{\text{ном}}^2}{|\dot{S}_3|} (\cos \varphi_3 + j \sin \varphi_3).$$

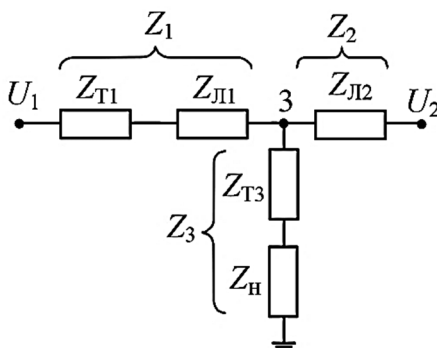


Рис. 5.7. Схема замещения электрической сети, приведенной на рис. 5.6

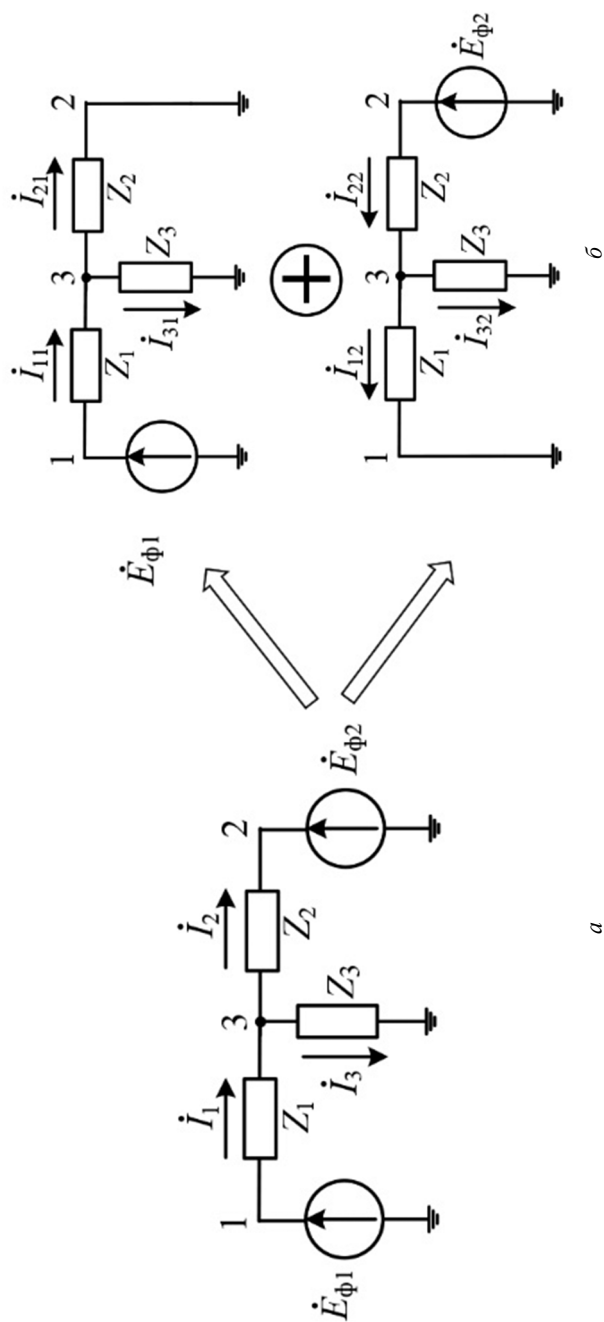


Рис. 5.8. Электрическая цепь (а), соответствующая одной фазе схемы сети, приведенной на рис. 5.6, и ее разложение на две составляющие (б)

Поскольку сопротивления линий и трансформаторов не зависят от значения тока (линейны), то можно воспользоваться принципом наложения режимов, создаваемых каждым источником ЭДС в отдельности, т.е. исходный режим, соответствующий электрической цепи, приведенной на рис. 5.8, *а*, представить в виде суммы двух независимых режимов, соответствующих рис. 5.8, *б*.

Тогда токи в ветвях цепи (рис. 5.8) определяются в соответствии с принципом наложения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12},$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{21} - \dot{I}_{22},$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{31} + \dot{I}_{32}.$$

Введем понятие собственной и взаимной проводимости. Собственная проводимость – проводимость, определяющая ток в рассматриваемой ветви *n* от действия ЭДС (источника питания) в данной ветви *n* при равенстве нулю ЭДС (закороченных источников питания) во всех остальных ветвях:

$$\dot{Y}_{nn} = \dot{I}_{nn} / \dot{E}_{\Phi n}.$$

Взаимная проводимость – проводимость, определяющая ток в рассматриваемой ветви *n* от действия ЭДС (источника питания) в другой ветви *m* при равенстве нулю ЭДС (закороченных источников питания) во всех остальных ветвях:

$$\dot{Y}_{nm} = \dot{I}_{nm} / \dot{E}_{\Phi m}.$$

Причем: $\dot{Y}_{nm} = \dot{Y}_{mn}$.

Для рассматриваемой простейшей цепи (рис. 5.8) исходя из введенного понятия собственной и взаимной проводимости:

$$\dot{Y}_{11} = \dot{I}_{11} / \dot{E}_{\Phi 1}, \quad \dot{Y}_{12} = \dot{I}_{12} / \dot{E}_{\Phi 2}.$$

Определим мощность, протекающую в ветви с сопротивлением Z_1 , и перейдем от фазных значений ЭДС к линейным:

$$\begin{aligned}\dot{S}_1 &= 3\dot{E}_{\phi 1}\hat{I}_1 = 3\dot{E}_{\phi 1}(\hat{I}_{11} - \hat{I}_{12}) = 3\dot{E}_{\phi 1}(\hat{E}_{\phi 1}\hat{Y}_{11} - \hat{E}_{\phi 2}\hat{Y}_{12}) = \\ &= \dot{E}_1^2\hat{Y}_{11} - \dot{E}_1\hat{E}_2\hat{Y}_{12}\end{aligned}$$

Выберем направление действительной оси, совпадающее с направлением $\dot{E}_{\phi 1}$ (рис. 5.9). Тогда $\dot{E}_{\phi 2}$, приняв условно отстающим от $\dot{E}_{\phi 1}$ на угол δ_{12} , представим как $\dot{E}_{\phi 2} = E_{\phi 2}\angle -\delta_{12}$.

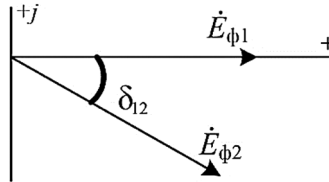


Рис. 5.9. Векторная диаграмма фазных ЭДС в узлах 1 и 2

Аналогично в полярной форме представим собственные и взаимные проводимости:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{11} &= Z_{11}\angle\psi_{11}, \\ \psi_{11} &= \arctg \frac{X_{11}}{R_{11}}, \\ \dot{Y}_{11} &= Y_{11}\angle -\psi_{11}.\end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned}\dot{S}_1 &= E_1^2 Y_{11}\angle\psi_{11} - E_1(E_2\angle +\delta_{12})Y_{12}\angle\psi_{12} = \\ &= E_1^2 Y_{11}(\cos\psi_{11} + j\sin\psi_{11}) - \\ &- E_1 E_2 Y_{12}(\cos(\psi_{12} + \delta_{12}) + j\sin(\psi_{12} + \delta_{12}))\end{aligned}$$

Вместо углов ψ принято использовать дополняющие их до 90° углы α : $\alpha_{ij} = \pi/2 - \psi_{ij}$.

Окончательно получим:

$$\begin{aligned}\dot{S}_1 &= E_1^2 Y_{11} (\sin \alpha_{11} + j \cos \alpha_{11}) - \\ &- E_1 E_2 Y_{12} (-\sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + j \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}))\end{aligned}$$

или переходя от электрической цепи к исходной электрической сети, заменим линейные значения ЭДС на заданные напряжения в узлах 1 и 2:

$$\begin{aligned}P_1 &= U_1^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ Q_1 &= U_1^2 Y_{11} \cos \alpha_{11} - U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12});\end{aligned}$$

где Y_{11} , Y_{12} – модули собственной и взаимной проводимости; α_{11} , α_{12} – углы, дополняющие аргументы собственного и взаимного сопротивления до 90° ; δ_{12} – угол между векторами напряжений U_1 и U_2 .

Аналогично можно получить выражения для P_2 и Q_2 :

$$\begin{aligned}P_2 &= -U_2^2 Y_{22} \sin \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}); \\ Q_2 &= -U_2^2 Y_{22} \cos \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}).\end{aligned}$$

Если пренебречь активными сопротивлениями:

$$\begin{aligned}P_1 &= P_2 = U_1 U_2 Y_{12} \sin \delta_{12}; \\ Q_1 &= U_1^2 Y_{11} - U_1 U_2 Y_{12} \cos \delta_{12}; \\ Q_2 &= -U_2^2 Y_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \cos \delta_{12}.\end{aligned}$$

Структура полученных выражений остается неизменной при любой связи электростанции с энергосистемой (в том числе и при не пренебрежении зарядными мощностями воздушных линий электропередачи, при отсутствии промежуточной подстанции и т.п.). Изменения в схеме влияют на значение собственных и вза-

имных проводимостей. Поэтому перейдем к определению собственных и взаимных проводимостей. Они могут быть рассчитаны либо методом единичных токов, либо преобразованием схемы.

Рассмотрим метод единичных токов. Зададимся $\dot{I}_{21} = 1$ А (рис. 5.8, б). Легко найти напряжение в узле 3: $\dot{U}_{\phi 3} = \dot{I}_{21} Z_2$,

зная которое можно определить ток $\dot{I}_{31}$: $\dot{I}_{31} = \frac{\dot{U}_{\phi 3}}{Z_3} = \frac{\dot{I}_{21} Z_2}{Z_3}$. В свою

очередь ток $\dot{I}_{11}$ может быть найден как $\dot{I}_{11} = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{31} = \dot{I}_{21} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right)$.

В результате можно определить значение ЭДС $\dot{E}_{\phi 1}$, которое нужно приложить к узлу 1, чтобы в сопротивлении Z_2 ток был равен 1 А:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\phi 1} &= \dot{U}_{\phi 3} + \dot{I}_{11} Z_1 = \dot{I}_{21} Z_2 + \dot{I}_{21} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) Z_1 = \\ &= \dot{I}_{21} \left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \right). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Согласно введенному определению взаимной проводимости $\dot{Y}_{21} = \frac{\dot{I}_{21}}{\dot{E}_{\phi 1}}$.

$$\text{Тогда: } \dot{Y}_{21} = \frac{\dot{I}_{21}}{\dot{E}_{\phi 1}} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}}.$$

В выражении (5.1), выразив $\dot{I}_{21}$ через $\dot{I}_{11}$, получим:

$$\dot{E}_{\phi 1} = \frac{\dot{I}_{11}}{1 + \frac{Z_2}{Z_3}} \left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \right) = \frac{\dot{I}_{11}}{\dot{Y}_{11}}.$$

Тогда: $\dot{Y}_{11} = \frac{1}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}}$.

Аналогично можно определить $\dot{Y}_{22}$ по схеме рис. 5.8, б, приняв $\dot{I}_{12} = 1$ А.

Вторым способом собственные и взаимные проводимости можно определить, преобразуя схему сети таким образом, чтобы ЭДС каждого источника оказалась соединенным непосредственно с каждой ЭДС всех остальных источников только одним сопротивлением. Такие преобразования выполняются стандартными приемами эквивалентирования последовательных и параллельных соединений сопротивлений в одно, преобразованием звезды в треугольник и наоборот и т.д. (см. раздел 5.5). Для рассматриваемой схемы рис. 5.8, а звезда из сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3 должна быть преобразована в треугольник (рис. 5.10):

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3};$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2};$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1}.$$

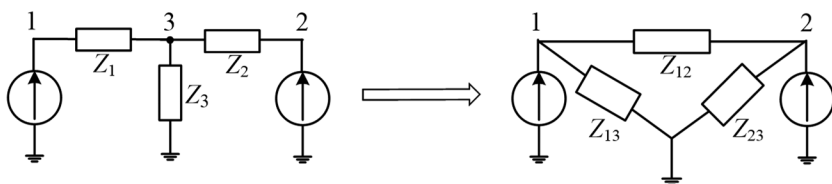


Рис. 5.10. Преобразование звезды в треугольник

Опираясь на введенные понятия собственной и взаимной проводимости, получим: $\dot{Y}_{11} = 1/Z_{12} + 1/Z_{13}$; $\dot{Y}_{12} = 1/Z_{12} = \dot{Y}_{21}$.

Изложенные выше методы определения собственных и взаимных проводимостей могут быть распространены для любого числа источников в схемы произвольной конфигурации.

Обобщая полученные результаты: взаимная проводимость равна проводимости ветви, связывающей рассматриваемые узлы; собственная проводимость равна сумме проводимостей всех ветвей, связанных с рассматриваемым узлом. Таким образом, они определяются только конфигурацией сети и значением сопротивлений ветвей.

Получив необходимые расчетные выражения и рассмотрев способы определения собственных и взаимных проводимостей, вернемся к рассмотрению исходной задачи на рис. 5.6. Алгоритм ее решения следующий.

1. Определяем собственные и взаимные проводимости.
2. Находим δ_{12} :

$$\delta_{12} = \arcsin \left(\frac{P_1 - U_1^2 Y_{11} \sin \alpha_{11}}{U_1 U_2 Y_{12}} \right) + \alpha_{12}.$$

3. Зная значение угла δ_{12} , можно рассчитать Q_1 :

$$Q_1 = U_1^2 Y_{11} \cos \alpha_{11} - U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}).$$

4. Для определения напряжения на шинах высшего напряжения ПС (U_3) применим метод расчета по заданным параметрам в начале передачи (см. раздел 3.3).

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии Л1:

$$\Delta U_{13} = \frac{P_1 R_{Л1} + Q_1 X_{Л1}}{U_1}.$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии Л1:

$$\delta U_{13} = \frac{P_1 X_{Л1} - Q_1 R_{Л1}}{U_1}.$$

Напряжение U_3 :

$$U_3 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{13})^2 + (\delta U_{13})^2}.$$

5. Значения P_2 , Q_2 можно рассчитать либо по выражениям:

$$P_2 = -U_2^2 Y_{22} \sin \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12});$$

$$Q_2 = -U_2^2 Y_{22} \cos \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}),$$

либо рассчитав режим по данным начала передачи (дано U_1 , P_1 , Q_1).

5.5. Основы расчета режимов электрических сетей произвольной конфигурации

Расчет режимов сложных электрических сетей вручную, когда требуется рассчитать параметры режима не во всех ветвях и узлах, а только в некоторых, можно производить преобразованием схемы сети. В результате сеть приводится к эквивалентной линии с двухсторонним питанием, режим которой рассчитывается методами, описанными в гл. 3 и 4.

Стандартные эквивалентные преобразования (приведем эти преобразования без вывода; их вывод рассматривается в теоретических основах электротехники):

1) эквивалентирование последовательно и параллельно соединенных сопротивлений в одно (рис. 5.11):

– последовательное соединение: $Z_{\text{экв}} = Z_1 + Z_2$;

– параллельное соединение: $Z_{\text{экв}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$;

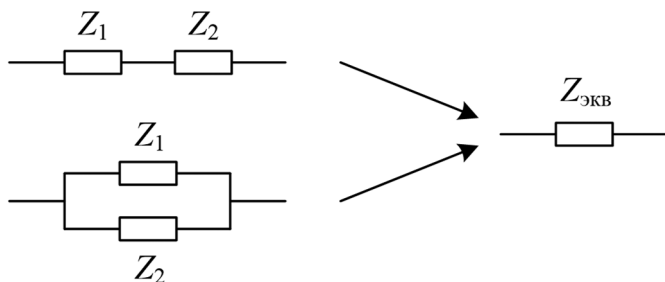


Рис. 5.11. Эквивалентирование последовательно и параллельно соединенных сопротивлений

2) преобразование звезды сопротивлений в треугольник сопротивлений и наоборот (рис. 5.12):

$$Z_1 = \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}};$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}};$$

$$Z_3 = \frac{Z_{13}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}};$$

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1Z_2}{Z_3};$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2};$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2Z_3}{Z_1}.$$

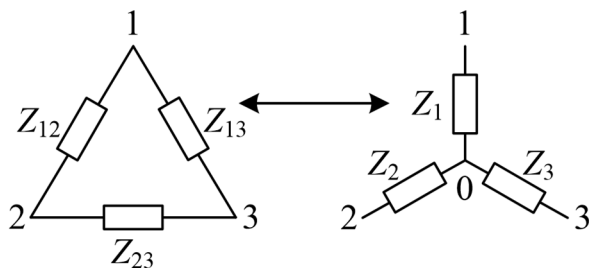


Рис. 5.12. Преобразование звезды в треугольник и наоборот

3) эквивалентирование нескольких параллельных линий с источниками питания в одну цепь (рис. 5.13):

$$\dot{E}_{\text{экв}} = \frac{\sum_{(m)} \dot{E}_m \frac{1}{Z_m}}{\sum_{(m)} \frac{1}{Z_m}};$$

$$Z_{\text{экв}} = \frac{1}{\sum_{(m)} \frac{1}{Z_m}}.$$

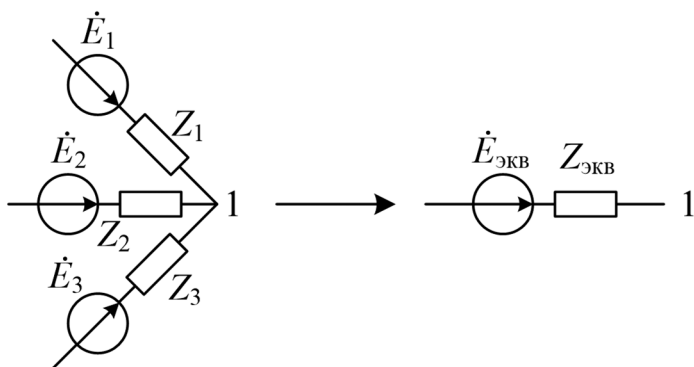


Рис. 5.13. Эквивалентирование нескольких параллельных линий

4) перенос (разнесение) нагрузки (рис. 5.14):

$$S_{11} = S_1 \frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2};$$

$$S_{12} = S_1 \frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2}.$$

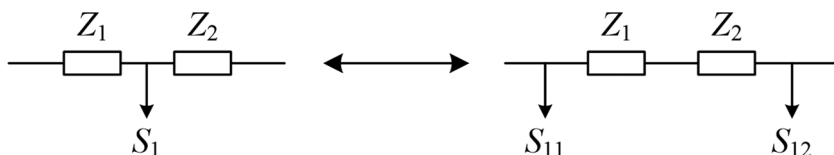


Рис. 5.14. Перенос (разнесение) нагрузки

В общем виде режимы сложных электрических сетей рассчитываются в матричном виде, составляя узловые уравнения.

Для описания структуры схемы электрической сети используют:

1) первая матрица инценденции **M**, элементы которой показывают связь ветвей и узлов. Узлам соответствуют строки матрицы, а ветвям – столбцы:

- $m_{ij} = 0$, если ветвь j не связана с узлом i ;
- $m_{ij} = +1$, если узел i является началом ветви j ;
- $m_{ij} = -1$, если узел i является концом ветви j .

2) матрица сопротивлений ветвей **Z_в**: значение z_{bii} соответствует сопротивлению данной ветви; все остальные элементы матрицы $z_{bij} = 0$.

Вектор-столбец задающих токов в узлах **J** определяет токи генерации и токи нагрузки. Матрицы токов ветвей **I** и вектор-столбец линейных напряжений в узлах **U** определяют искомые параметры режима.

Пример матриц $\underline{\mathbf{M}}$ и $\underline{\mathbf{Z}}_{\text{в}}$ для схемы сети на рис. 5.15:

$$\underline{\mathbf{M}} = \begin{array}{c|cccccc} & 01 & 02 & 03 & 14 & 24 & 34 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{array};$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_{\text{в}} = \begin{array}{c|cccccc} & 01 & 02 & 03 & 14 & 24 & 34 \\ \hline 01 & z_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 02 & 0 & z_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 03 & 0 & 0 & z_{03} & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 0 & 0 & 0 & z_{14} & 0 & 0 \\ 24 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{24} & 0 \\ 23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{34} \end{array}.$$

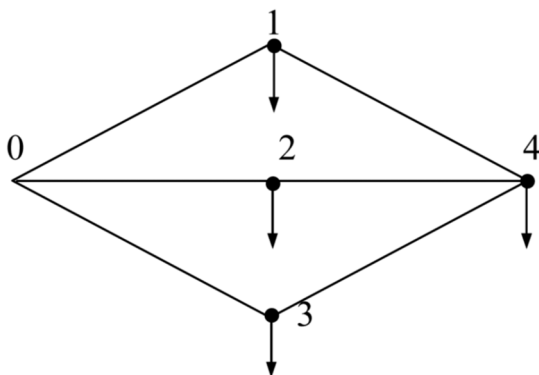


Рис. 5.15. Схема сложно-замкнутой сети

Узловые уравнения в матричном виде имеют вид:

$$\underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{U}} = \sqrt{3}\underline{\mathbf{J}}; \quad (5.2)$$

где $\underline{\mathbf{Y}}$ – матрица узловых проводимостей:

$$\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{Z}}_{\text{B}}^{-1}\underline{\mathbf{M}}^{\text{T}},$$

где $\underline{\mathbf{Z}}_{\text{B}}^{-1}$ – обратная матрица сопротивлений ветвей $\underline{\mathbf{Z}}_{\text{B}}$;

$\underline{\mathbf{M}}^{\text{T}}$ – транспонированная первая матрица инценденции $\underline{\mathbf{M}}$.

Любой не диагональный элемент матрицы узловых проводимостей $\underline{\mathbf{Y}}$ равен проводимости ветви, соединяющий узлы i и j ,

$y_{ij} = 1/z_{ij}$; если узлы i и j не соединены ветвью, то он равен 0.

Любой диагональный элемент равен сумме проводимостей всех ветвей, соединенных с узлом i , взятой с обратным знаком:

$$y_{ii} = -\sum_{(j)} 1/z_{ij}.$$

Пример матриц $\underline{\mathbf{Y}}$ для схемы сети на рис. 5.15:

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{vmatrix} -\left(\frac{1}{z_{01}} + \frac{1}{z_{02}} + \frac{1}{z_{03}}\right) & \frac{1}{z_{01}} & \frac{1}{z_{02}} & \frac{1}{z_{03}} & 0 \\ \frac{1}{z_{01}} & -\left(\frac{1}{z_{01}} + \frac{1}{z_{14}}\right) & 0 & 0 & \frac{1}{z_{14}} \\ \frac{1}{z_{02}} & 0 & -\left(\frac{1}{z_{02}} + \frac{1}{z_{24}}\right) & 0 & \frac{1}{z_{24}} \\ \frac{1}{z_{03}} & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{z_{03}} + \frac{1}{z_{34}}\right) & \frac{1}{z_{34}} \\ 0 & \frac{1}{z_{14}} & \frac{1}{z_{24}} & \frac{1}{z_{34}} & -\left(\frac{1}{z_{14}} + \frac{1}{z_{24}} + \frac{1}{z_{34}}\right) \end{vmatrix}.$$

Полученная система линейных уравнений (5.2) может быть решена прямым методом Гаусса. Поскольку в электроэнергетике вместо токов оперируют мощностью, то вместо вектора-столбца задающих токов используют вектор-столбец мощностей в узлах $\underline{S}_y$:

$$\underline{S}_y = \sqrt{3} \underline{U}^{\Delta} \underline{J}; \quad (5.3)$$

где $\underline{U}^{\Delta}$ – диагональная матрица, в которой значения напряжений в узлах расположены по главной диагонали, а остальные элементы нулевые.

Выразив вектор-столбец задающих токов $\underline{J}$ через вектор-столбец мощностей в узлах $\underline{S}_y$ из (5.3) и, подставив это соотношение в (5.2) получим систему уравнений:

$$\underline{U}^{\Delta} \hat{\underline{Y}} \hat{\underline{U}} = \underline{S}_y,$$

которая нелинейна относительно искомых напряжений в узлах. Решение системы нелинейных уравнений возможно только итерационными методами, например: простой итерации, Зейделя, Ньютона.

Такой подход реализуется в современных программах по расчету установившихся режимов. В качестве исходных данных задаются параметры узлов и ветвей и базисное напряжение в одном из узлов. На основе этих данных формируется матрица узловых проводимостей и осуществляется расчет режима.

Примеры решения задач

Задача 5.1

На понижающей подстанции установлены два параллельно работающих автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110. Нагрузка на шинах низшего напряжения подстанции составляет: $P_n = 86$ МВт, $Q_n = 25$ Мвар; на шинах среднего напряжения: $P_c = 75$ МВт, $Q_c = 27$ Мвар. Из расчета режима сети высшего напряжения известно напряжение на стороне высшего напряжения подстанции $U_b = 216$ кВ (рис. 5.16). Рассчитать режим работы

автотрансформаторов, т.е. найти потокораспределение в схеме замещения подстанции и напряжения на шинах среднего и низшего напряжений.

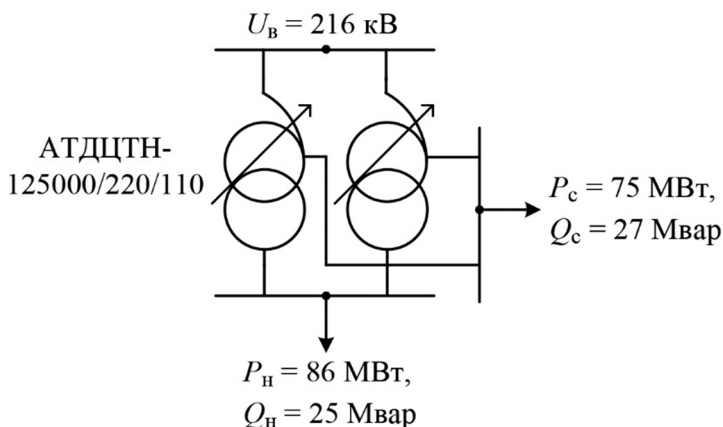


Рис. 5.16. Схема подстанции

Решение. Составим схему замещения автотрансформаторов подстанции (рис. 5.17).

По справочным данным определяем параметры лучей схемы замещения автотрансформатора с учетом установки двух автотрансформаторов на подстанции (значения сопротивлений приведены к стороне высшего напряжения): $R_b = 0,25 \text{ Ом}$, $X_b = 24,3 \text{ Ом}$, $R_c = 0,25 \text{ Ом}$, $X_c = 0 \text{ Ом}$, $R_n = 0,5 \text{ Ом}$, $X_n = 41,3 \text{ Ом}$; потери холостого хода: $\Delta P_x = 0,17 \text{ МВт}$, $\Delta Q_x = 1,25 \text{ Мвар}$.

На рисунке 5.17 обозначим мощности, протекающие по лучам схемы замещения автотрансформаторов, и напряжения в ее узлах (принцип такой же как и для схем замещения линий):

- мощность в конце луча среднего напряжения S_c'' ;
- мощность в начале луча среднего напряжения S_c' ;
- мощность в конце луча низшего напряжения S_n'' ;
- мощность в начале луча низшего напряжения S_n' ;

- мощность в конце луча высшего напряжения S''_B ;
- мощность в начале луча высшего напряжения S'_B ;
- приведенная нагрузка подстанции $S_{\text{прив}}$;
- напряжение на шинах ВН U_B ;
- напряжение в средней точке схемы замещения автотрансформатора U_0 ;
- напряжение на шинах СН, приведенное к стороне ВН U'_c ;
- напряжение на шинах НН, приведенное к стороне ВН U'_H ;
- напряжение на шинах СН U_c ;
- напряжение на шинах НН U_H .

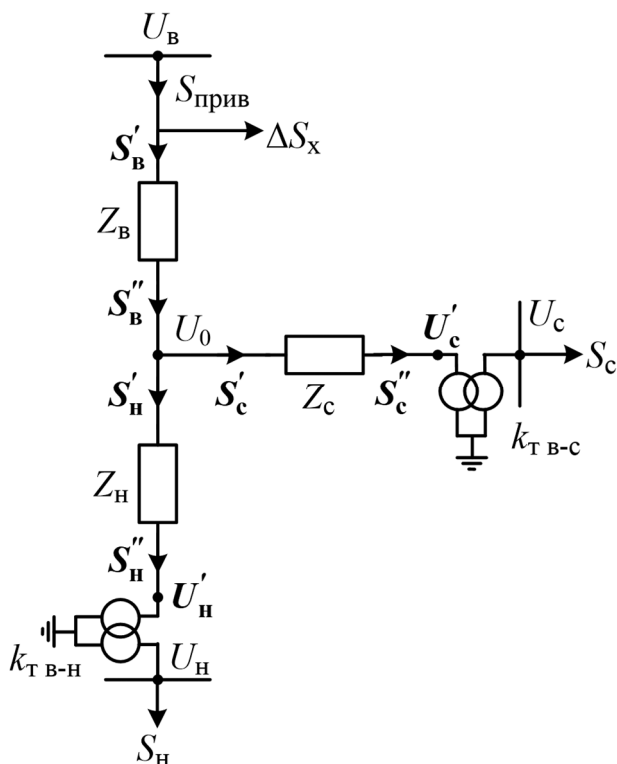


Рис. 5.17. Схема замещения автотрансформаторов

1-й этап. $U_{\text{н}}^{(0)} = U_{\text{с}}^{(0)} = U_0^{(0)} = U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ.}$

Обратите внимание: поскольку значения сопротивлений лучей СН и НН приведены к стороне ВН, то при расчете режимов работы автотрансформаторов в качестве нулевых приближений напряжений в узлах $U_0^{(0)}$, $U_{\text{с}}^{(0)}$, $U_{\text{н}}^{(0)}$ принимается номинальное напряжение сети, связанной с лучом высшего напряжения.

Луч среднего напряжения

Мощность в конце луча среднего напряжения:

$$S_{\text{с}}'' = P_{\text{с}} + jQ_{\text{с}} = 75 + j27 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Обратите внимание: при переходе через идеальный трансформатор (трансформатор без потерь) при расчете первого этапа коэффициент трансформации не учитывается, так как мощность до идеального трансформатора равняется мощности после него.

Потери мощности в луче среднего напряжения:

$$\Delta S_{\text{с}} = \frac{(S_{\text{с}}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{\text{с}} = \frac{75^2 + 27^2}{220^2} \cdot (0,25 + j0) = 0,033 \text{ МВт.}$$

Мощность в начале луча среднего напряжения:

$$S_{\text{с}}' = S_{\text{с}}'' + \Delta S_{\text{с}} = 75 + j27 + 0,033 = 75,0 + j27 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Луч низшего напряжения

Мощность в конце луча низшего напряжения:

$$S_{\text{н}}'' = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}} = 86 + j25 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Потери мощности в луче низшего напряжения:

$$\Delta S_{\text{н}} = \frac{(S_{\text{н}}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_{\text{н}} = \frac{86^2 + 25^2}{220^2} \cdot (0,5 + j41,3) = 0,083 + j6,84 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Мощность в начале луча низшего напряжения:

$$S'_n = S''_n + \Delta S_n = 86 + j25 + 0,083 + j6,84 = 86,1 + j31,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Луч высшего напряжения

Мощность в конце луча высшего напряжения:

$$S''_B = S'_c + S'_n = 75 + j27 + 86,1 + j31,8 = 161,1 + j58,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в луче высшего напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta S_B &= \frac{(S''_B)^2}{U_{\text{ном}}^2} Z_B = \frac{161,1^2 + 58,8^2}{220^2} \cdot (0,25 + j24,3) = \\ &= 0,152 + j \cdot 14,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Мощность в начале луча высшего напряжения:

$$S'_B = S''_B + \Delta S_B = 161,1 + j58,8 + 0,152 + j14,8 = 161,3 + j73,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Приведенная нагрузка подстанции:

$$\begin{aligned} S_{\text{прив}} &= S'_B + \Delta S_x = 161,3 + j73,6 + 0,17 + j1,25 = \\ &= 161,5 + j74,9 \text{ МВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

2-й этап. Поскольку рассчитывается элемент сети с номинальным напряжением 220 кВ, то учитываем поперечную составляющую вектора падения напряжения.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на луче высшего напряжения:

$$\Delta U_B = \frac{P'_B R_B + Q'_B X_B}{U_B} = \frac{161,3 \cdot 0,25 + 73,6 \cdot 24,3}{216} = 8,47 \text{ кВ}.$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на
луче высшего напряжения:

$$\delta U_{\text{в}} = \frac{P'_{\text{в}} X_{\text{в}} - Q'_{\text{в}} R_{\text{в}}}{U_{\text{в}}} = \frac{161,3 \cdot 24,3 - 73,6 \cdot 0,25}{216} = 18,1 \text{ кВ.}$$

Напряжение в средней точке автотрансформатора:

$$U_0 = \sqrt{(U_{\text{в}} - \Delta U_{\text{в}})^2 + (\delta U_{\text{в}})^2} = \sqrt{(216 - 8,47)^2 + (18,1)^2} = 208,3 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на
луче среднего напряжения:

$$\Delta U_{\text{с}} = \frac{P'_{\text{с}} R_{\text{с}} + Q'_{\text{с}} X_{\text{с}}}{U_0} = \frac{75 \cdot 0,25 + 27 \cdot 0}{208,3} = 0,090 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на
луче среднего напряжения:

$$\delta U_{\text{с}} = \frac{P'_{\text{с}} X_{\text{с}} - Q'_{\text{с}} R_{\text{с}}}{U_0} = \frac{75 \cdot 0 - 27 \cdot 0,25}{208,3} = -0,032 \text{ кВ.}$$

Напряжение на шинах среднего напряжения, приведенное к
стороне высшего напряжения:

$$\begin{aligned} U'_{\text{с}} &= \sqrt{(U_0 - \Delta U_{\text{с}})^2 + (\delta U_{\text{с}})^2} = \\ &= \sqrt{(208,3 - 0,09)^2 + (-0,032)^2} = 208,2 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на
луче низшего напряжения:

$$\Delta U_{\text{н}} = \frac{P'_{\text{н}} R_{\text{н}} + Q'_{\text{н}} X_{\text{н}}}{U_0} = \frac{86,1 \cdot 0,5 + 31,8 \cdot 41,3}{208,3} = 6,51 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на
луче низшего напряжения:

$$\delta U_{\text{н}} = \frac{P'_{\text{н}} X_{\text{н}} - Q'_{\text{н}} R_{\text{н}}}{U_0} = \frac{86,1 \cdot 41,3 - 31,8 \cdot 0,5}{208,3} = 17,0 \text{ кВ.}$$

Напряжение на шинах низшего напряжения, приведенное к
стороне высшего напряжения:

$$U'_{\text{н}} = \sqrt{(U_0 - \Delta U_{\text{н}})^2 + (\delta U_{\text{н}})^2} = \sqrt{(208,3 - 6,51)^2 + (17)^2} = 202,5 \text{ кВ.}$$

Для нахождения напряжения на шинах среднего и низшего
напряжения подстанции $U_{\text{с}}$ и $U_{\text{н}}$ необходимо знать фактический
коэффициент трансформации автотрансформаторов для перехода
через идеальные трансформаторы схемы замещения (рис. 5.6).
Если принять, что они равны номинальным, то:

$$U_{\text{н}} = U'_{\text{н}} k_{\text{т в н}} = U'_{\text{н}} \frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{вн}}} = 202,5 \frac{11}{230} = 9,68 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{с}} = U'_{\text{с}} k_{\text{т в с}} = U'_{\text{с}} \frac{U_{\text{сн}}}{U_{\text{вн}}} = 208,2 \frac{121}{230} = 109,5 \text{ кВ},$$

где $U_{\text{вн}}$, $U_{\text{сн}}$, $U_{\text{нн}}$ – номинальное напряжение обмотки соответ-
ственно высшего, среднего и низшего напряжения; по справоч-
ным данным $U_{\text{вн}} = 230 \text{ кВ}$, $U_{\text{сн}} = 121 \text{ кВ}$, $U_{\text{нн}} = 11 \text{ кВ}$.

Задача 5.2

По двухцепной электропередаче 110 кВ получают питание
две подстанции (рис. 5.18). Линии 01 и 12 выполнены проводами
АС 240/32 ($R_0 = 0,118 \text{ Ом/км}$, $X_0 = 0,405 \text{ Ом/км}$, $B_0 = 2,81 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$)
и имеют длину 50 км каждая. Напряжение на шинах источника
питания составляет $U_0 = 120 \text{ кВ}$. Нагрузки в узлах заданы статиче-
скими характеристиками нагрузки. При номинальном напряжении

нагрузка в узлах составляет: $P_{\text{прив1}} = 40$ МВт, $Q_{\text{прив1}} = 15$ Мвар, $P_{\text{прив2}} = 40$ МВт, $Q_{\text{прив2}} = 15$ Мвар. Статические характеристики нагрузки в относительных единицах заданы следующими полиномами:

$$P_*(U) = 0,83 - 0,3 \cdot \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} + 0,47 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2;$$

$$Q_*(U) = 3,7 - 7 \cdot \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} + 4,3 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2.$$

Определить напряжение на шинах высшего напряжения ПС1 и ПС2 (U_1 и U_2).

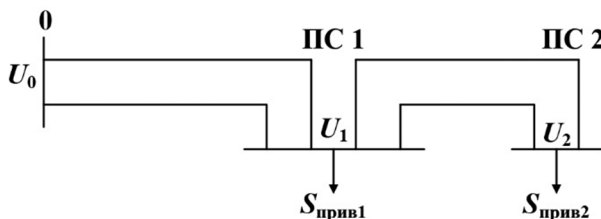


Рис. 5.18. Схема сети

Решение. Приведем схему замещения сети, указав на ней мощности в ветвях (рис. 5.19).

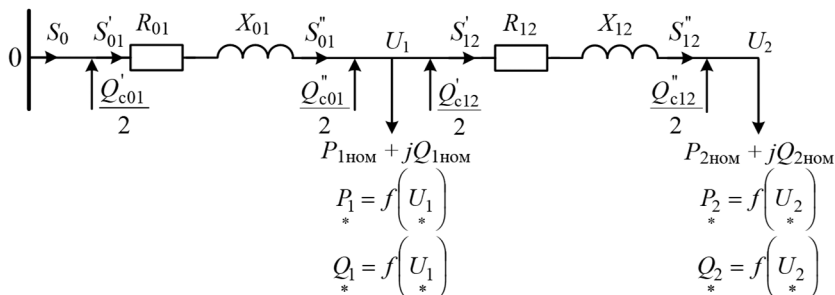


Рис. 5.19. Схема замещения электрической сети

Активное сопротивление проводов линий 01 и 12:

$$R_{01} = R_{12} = \frac{R_0 \cdot L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,118 \cdot 50}{2} = 2,95 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление линий 01 и 12:

$$X_{01} = X_{12} = \frac{X_0 \cdot L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,405 \cdot 50}{2} = 10,1 \text{ Ом}.$$

Емкостная проводимость линий 01 и 12:

$$B_{01} = B_{12} = n_{\text{ц}} \cdot B_0 \cdot L = 2 \cdot 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 281 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Решим задачу методом систематизированного подбора.

На первой итерации зададимся значением напряжения в узле 2: $U_2^{(1)} = U_0 = 120 \text{ кВ}$.

Обратите внимание: при задании напряжения в конце передачи и при известных мощностях нагрузки задача на каждой итерации решается по данным концам магистральной электропередачи.

Далее, чтобы не увеличивать число индексов у параметров режима, обозначение номера итераций будем опускать у всех параметров, кроме напряжений в узлах.

Приведенная нагрузка в узле 2 при напряжении $U_2^{(1)}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{прив2}} &= P_{\text{прив2}} \cdot P_{*}(U_2^{(1)}) = P_{\text{прив2}} \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}} + 0,47 \cdot \left(\frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 40 \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{120}{110} + 0,47 \cdot \left(\frac{120}{110} \right)^2 \right] = 42,5 \text{ МВт.} \\ Q_{\text{прив2}} &= Q_{\text{прив2}} \cdot Q_{*}(U_2^{(1)}) = Q_{\text{прив2}} \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}} + 4,3 \cdot \left(\frac{U_2^{(1)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 15 \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{120}{110} + 4,3 \cdot \left(\frac{120}{110} \right)^2 \right] = 17,7 \text{ Мвар.} \end{aligned}$$

Половина зарядной мощности в конце линии 12:

$$\frac{Q_{c12}''}{2} = \frac{\left(U_2^{(1)}\right)^2 B_{12}}{2} = \frac{120^2 \cdot 281 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,02 \text{ Мвар.}$$

Расчетная нагрузка ПС2:

$$\begin{aligned} S_{p2} &= S_{\text{прив2}} - j \frac{Q_{c12}'}{2} = 42,5 + j17,7 - j2,02 = \\ &= 42,5 + j15,7 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Мощность в конце линии 12:

$$S_{12}'' = S_{p2} = 42,5 + j15,7 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned} \Delta S_{12} &= \frac{\left(S_{12}''\right)^2}{\left(U_2^{(1)}\right)^2} Z_{12} = \frac{42,5^2 + 15,7^2}{120^2} \cdot (2,95 + j10,1) = \\ &= 0,42 + j1,44 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 12:

$$S_{12}' = S_{12}'' + \Delta S_{12} = 42,5 + j15,7 + 0,42 + j1,44 = 42,9 + j17,1 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии 12:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}'' R_{12} + Q_{12}'' X_{12}}{U_2^{(1)}} = \frac{42,5 \cdot 2,95 + 15,7 \cdot 10,1}{120} = 2,37 \text{ кВ.}$$

Поскольку рассчитывается элемент сети с номинальным напряжением 110 кВ, то поперечная составляющая вектора падения напряжения не учитывается.

Напряжение в узле 1:

$$U_1^{(1)} = U_2^{(1)} + \Delta U_{\text{ИП-1}} = 120 + 2,37 = 122,4 \text{ кВ.}$$

Приведенная нагрузка в узле 1 при напряжении $U_1^{(1)}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{прив1}} &= P_{\text{прив1}} \cdot P_{*}(U_1^{(1)}) = P_{\text{прив1}} \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{U_1^{(1)}}{U_{\text{ном}}} + 0,47 \cdot \left(\frac{U_1^{(1)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 40 \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{122,4}{110} + 0,47 \cdot \left(\frac{122,4}{110} \right)^2 \right] = 43,1 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{прив1}} &= Q_{\text{прив1}} \cdot Q_{*}(U_1^{(1)}) = Q_{\text{прив1}} \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{U_1^{(1)}}{U_{\text{ном}}} + 4,3 \cdot \left(\frac{U_1^{(1)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 15 \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{122,4}{110} + 4,3 \cdot \left(\frac{122,4}{110} \right)^2 \right] = 18,5 \text{ Мвар.} \end{aligned}$$

Половина зарядной мощности в начале линии 12:

$$\frac{Q'_{c12}}{2} = \frac{(U_1^{(1)})^2 B_{12}}{2} = \frac{122,4^2 \cdot 281 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,1 \text{ Мвар.}$$

Половина зарядной мощности в конце линии 01:

$$\frac{Q''_{c01}}{2} = \frac{(U_1^{(1)})^2 B_{01}}{2} = \frac{122,4^2 \cdot 281 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,1 \text{ Мвар.}$$

Расчетная нагрузка ПС1:

$$S_{p1} = S_{\text{прив1}} - j \left(\frac{Q_{c12}''}{2} + \frac{Q_{c12}'}{2} \right) =$$

$$= 43,1 + j17,7 - j2,02 = 43,1 + j14,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в конце линии 01:

$$S_{01}'' = S_{12}' + S_{p1} = 42,9 + j17,1 + 43,1 + j14,3 = 86,0 + j31,4 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии 01:

$$\Delta S_{01} = \frac{(S_{01}'')^2}{(U_1^{(1)})^2} Z_{01} = \frac{86,0^2 + 31,4^2}{122,4^2} \cdot (2,95 + j10,1) =$$

$$= 1,65 + j5,67 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в начале линии 01:

$$S_{01}' = S_{01}'' + \Delta S_{01} = 86,0 + j31,4 + 1,65 + j5,67 = 87,7 + j37,1 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии 01:

$$\Delta U_{01} = \frac{P_{01}'' R_{01} + Q_{01}'' X_{01}}{U_1^{(1)}} =$$

$$= \frac{86,0 \cdot 2,95 + 31,4 \cdot 10,1}{122,4} = 4,68 \text{ кВ}.$$

Напряжение в узле 0:

$$U_0^{(1)} = U_1^{(1)} + \Delta U_{01} = 122,4 + 4,68 = 127,1 \text{ кВ}.$$

Обратите внимание: по результатам первой итерации напряжение на шинах источника питания оказалось намного больше заданного, поскольку напряжение в конце электропередачи было задано заведомо большее, чем может быть.

Половина зарядной мощности в начале линии 01:

$$\frac{Q'_{c01}}{2} = \frac{(U_0^{(1)})^2}{2} B_{01} = \frac{127,1^2 \cdot 281 \cdot 10^{-6}}{2} = 2,27 \text{ Мвар.}$$

Мощность, выдаваемая источником питания в сеть:

$$S_0 = S'_{01} - j \frac{Q'_{c01}}{2} = 87,7 + j37,1 - j2,27 = 87,7 + j34,8 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

На второй итерации зададимся значением напряжения в узле 2 заведомо меньшим, чем оно может быть для данной схемы и заданных параметров $U_2^{(2)} = 110 \text{ кВ}$.

Приведенная нагрузка в узле 2 при напряжении $U_2^{(1)}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{прив2}} &= P_{\text{прив2}} \cdot P_{*}(U_2^{(2)}) = P_{\text{прив2}} \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{U_2^{(2)}}{U_{\text{ном}}} + 0,47 \cdot \left(\frac{U_2^{(2)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 40 \cdot \left[0,83 - 0,3 \cdot \frac{110}{110} + 0,47 \cdot \left(\frac{110}{110} \right)^2 \right] = 40 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{прив2}} &= Q_{\text{прив2}} \cdot Q_{*}(U_2^{(2)}) = Q_{\text{прив2}} \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{U_2^{(2)}}{U_{\text{ном}}} + 4,3 \cdot \left(\frac{U_2^{(2)}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] = \\ &= 15 \cdot \left[3,7 - 7 \cdot \frac{110}{110} + 4,3 \cdot \left(\frac{110}{110} \right)^2 \right] = 15 \text{ Мвар.} \end{aligned}$$

Далее расчет аналогичен первой итерации. Приведем результаты расчета напряжений в узлах: $U_1^{(2)} = 112,3 \text{ кВ}$; $U_0^{(2)} = 116,8 \text{ кВ}$.

Для формирования навыков расчета установившихся режимов рекомендуется выполнить расчет второй итерации самостоятельно и свериться с приведенными результатами.

Обратите внимание: по результатам второй итерации напряжение на шинах источника питания оказалось меньше заданного.

На *третьей итерации* значение напряжения в узле 2 $U_2^{(3)}$ задается между значений, принятых на первой и второй итерации. Пусть $U_2^{(3)} = 114$ кВ.

Результаты расчета напряжений в узлах: $U_1^{(3)} = 116,3$ кВ;
 $U_0^{(3)} = 120,9$ кВ.

По результатам расчетов трех итераций построим зависимость значений напряжения U_0 и U_1 (значения, которые были получены по результатам расчета трех итераций) от значения напряжения U_2 (рис. 5.20).

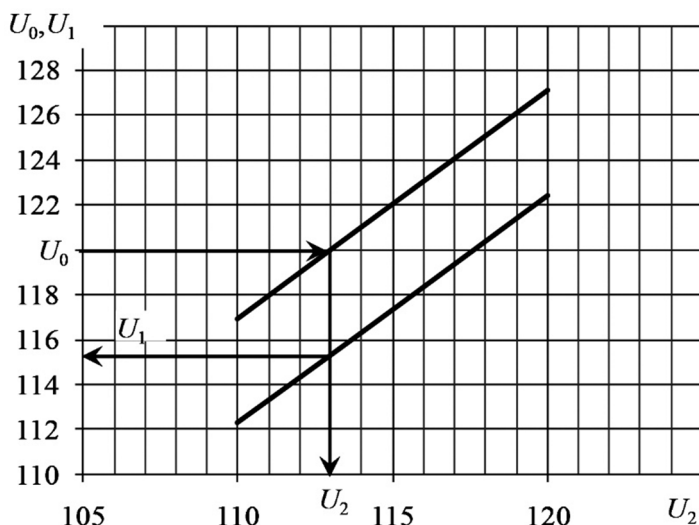


Рис. 5.20. Зависимость напряжений в узлах 0 и 1 от напряжения в узле 2

Используя зависимость $U_0 = f(U_2)$ по заданному в исходных данных значению U_0 , определяют фактическое значение напряжения U_2 : $U_2 = 113$ кВ. Далее по зависимости $U_1 = f(U_2)$ по фактическому значению напряжения U_2 определяют фактическое значение напряжения U_1 : $U_1 = 115,5$ кВ.

Задача 5.3

Рассчитать режим электрической сети напряжением 20 кВ. Линии электропередачи выполнены однофазными медными кабелями сечением 120 мм^2 с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенными в земле треугольником. Схема сети, на которой приведены мощности нагрузок в узлах ($\text{МВ} \cdot \text{А}$) и длины линий (км) представлена на рис. 5.21. Напряжение в узле 0 составляет 20,2 кВ.

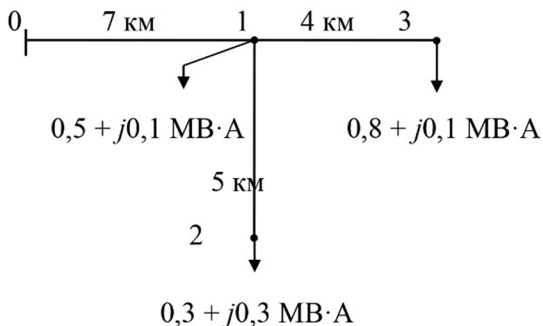


Рис. 5.21. Схема сети 20 кВ. Все линии одноцепные

Решение. По справочным данным определим удельное активное и индуктивное сопротивление кабельных линий, выполненных из однофазных медных кабелей сечением 120 мм^2 с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенных в земле треугольником:

$$R_0 = 0,153 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; \quad X_0 = 0,123 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

Рассчитаем активные и индуктивные сопротивления участков сети:

$$R_{01} = \frac{R_{0.01} \cdot L_{01}}{n_{\text{ц.01}}} = \frac{0,153 \cdot 7}{1} = 1,07 \text{ Ом};$$

$$R_{12} = \frac{R_{0.12} \cdot L_{12}}{n_{\text{ц.12}}} = \frac{0,153 \cdot 5}{1} = 0,765 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = \frac{R_{0.13} \cdot L_{13}}{n_{\text{ц.13}}} = \frac{0,153 \cdot 4}{1} = 0,612 \text{ Ом};$$

$$X_{01} = \frac{X_{0.01} \cdot L_{01}}{n_{\text{н.01}}} = \frac{0,123 \cdot 7}{1} = 0,861 \text{ Ом};$$

$$X_{12} = \frac{X_{0.12} \cdot L_{12}}{n_{\text{н.12}}} = \frac{0,123 \cdot 5}{1} = 0,615 \text{ Ом};$$

$$X_{13} = \frac{X_{0.13} \cdot L_{13}}{n_{\text{н.13}}} = \frac{0,153 \cdot 4}{1} = 0,492 \text{ Ом}.$$

Учитывая допущения, используемые при расчете сетей напряжением до 20 кВ, определим:

1) мощности, передаваемые по участкам 01, 12 и 13:

$$S_{12} = S_2 = 0,3 + j0,3 \text{ МВА};$$

$$S_{13} = S_3 = 0,8 + j0,1 \text{ МВА};$$

$$\begin{aligned} S_{01} = S_1 + S_2 + S_3 &= 0,5 + j0,1 + 0,3 + j0,3 + 0,8 + j0,1 = \\ &= 1,6 + j0,5 \text{ МВА}; \end{aligned}$$

2) потери напряжения на участках 01, 12 и 13:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} R_{12} + Q_{12} X_{12}}{U_{\text{ном}}} = \frac{0,3 \cdot 0,765 + 0,3 \cdot 0,615}{20} = 0,021 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_{13} = \frac{P_{13} R_{13} + Q_{13} X_{13}}{U_{\text{ном}}} = \frac{0,8 \cdot 0,612 + 0,1 \cdot 0,492}{20} = 0,027 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_{01} = \frac{P_{01} R_{01} + Q_{01} X_{01}}{U_{\text{ном}}} = \frac{1,6 \cdot 1,07 + 0,5 \cdot 0,861}{20} = 0,107 \text{ кВ};$$

3) напряжения в узлах 1, 2 и 3:

$$U_1 = U_0 - \Delta U_{01} = 20,2 - 0,107 = 20,09 \text{ кВ};$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U_{01} - \Delta U_{12} = 20,2 - 0,107 - 0,021 = 20,07 \text{ кВ};$$

$$U_3 = U_0 - \Delta U_{01} - \Delta U_{13} = 20,2 - 0,107 - 0,027 = 20,07 \text{ кВ}.$$

Задача 5.4

По электропередаче 220 кВ осуществляется выдача мощности электрической станции (ЭС) в приемную систему (ЭЭС) через шины промежуточной подстанции (ПС) (рис. 5.22). Эквивалентные параметры схемы замещения первого участка электропередачи (от ЭС до ПС): $R_{л1} = 3,75$ Ом, $X_{л1} = 21$ Ом, $B_{л1} = 540 \cdot 10^{-6}$ См; второго участка (от ПС до ЭЭС): $R_{л2} = 3,84$ Ом, $X_{л2} = 17,6$ Ом, $B_{л2} = 423,2 \cdot 10^{-6}$ См.

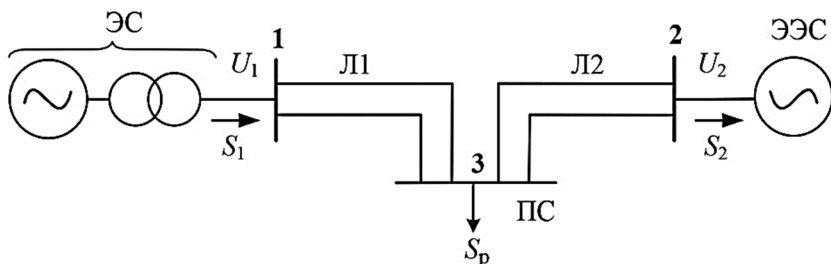


Рис. 5.22. Схема электропередачи

В соответствии с диспетчерским графиком выдаваемая с шин высшего напряжения ЭС активная мощность в электропередачу составляет $P_1 = 250$ МВт. Расчетная нагрузка ПС $S_p = 80 + j20$ МВ·А. Напряжение на шинах высшего напряжения ЭС поддерживается неизменным и равным $U_1 = 242$ кВ, напряжение на шинах ЭЭС составляет $U_2 = 230$ кВ.

Определить потокораспределение в электрической сети и напряжение на шинах высшего напряжения ПС (U_3).

Решение. Режим электрических сетей с двумя источниками питания (рис. 5.23) рассчитывается по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ Q_1 &= U_1^2 Y_{11} \cos \alpha_{11} - U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ P_2 &= -U_2^2 Y_{22} \sin \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}); \\ Q_2 &= -U_2^2 Y_{22} \cos \alpha_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}), \end{aligned}$$

где Y_{11} , Y_{22} , Y_{12} – модули собственных и взаимных проводимостей; α_{11} , α_{22} , α_{12} – углы, дополняющие аргументы собственных и взаимных сопротивлений до 90° ; δ_{12} – угол между векторами напряжений U_1 и U_2 .

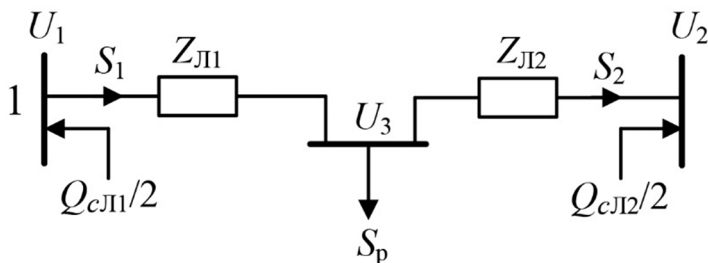


Рис. 5.23. Схема замещения электропередачи

Обратите внимание: соответствующие зарядным мощностям емкостные проводимости учитываются в собственных и взаимных проводимостях. Введение двух дополнительных ветвей, отражающих емкостные проводимости в начале (у шин ЭС) и в конце (у шин ЭЭС) электропередачи значительно усложнит определение собственных и взаимных проводимостей. Поэтому «точку подключения» половинок зарядных мощностей линий со стороны шин ЭС и ЭЭС целесообразно графически перенести непосредственно на шины ЭС и ЭЭС.

Баланс мощностей на данных шинах от этого не меняется. Но необходимо помнить, что реактивная мощность, выдаваемая с шин высшего напряжения ЭС, будет меньше Q_1 (рис. 5.23) на величину $Q_{сЛ1}/2$. Аналогично реактивная мощность, принимаемая на шинах высшего напряжения ЭЭС, будет больше Q_2 (рис. 5.23) на величину $Q_{сЛ2}/2$.

Определим собственные и взаимные проводимости электропередачи преобразованием схемы сети.

Для этого расчетную нагрузку подстанции представим в виде неизменного сопротивления, предполагая равенство напряжения на шинах высшего напряжения ПС номинальному напряжению сети:

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} = \frac{P_{\text{п}}}{\sqrt{P_{\text{п}}^2 + Q_{\text{п}}^2}} = \frac{80}{\sqrt{80^2 + 20^2}} = 0,970;$$

$$\sin \varphi_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} = \frac{Q_{\text{п}}}{\sqrt{P_{\text{п}}^2 + Q_{\text{п}}^2}} = \frac{20}{\sqrt{80^2 + 20^2}} = 0,243;$$

$$Z_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{п}}} (\cos \varphi_{\text{н}} + j \sin \varphi_{\text{н}}) =$$

$$= \frac{220^2}{\sqrt{80^2 + 20^2}} \cdot (0,970 + j0,243) = 569,3 + j142,6 \text{ Ом.}$$

Получим схему замещения сети (рис. 5.24, а), которую стандартным преобразованием звезды в треугольник представим в виде рис. 5.24, б.

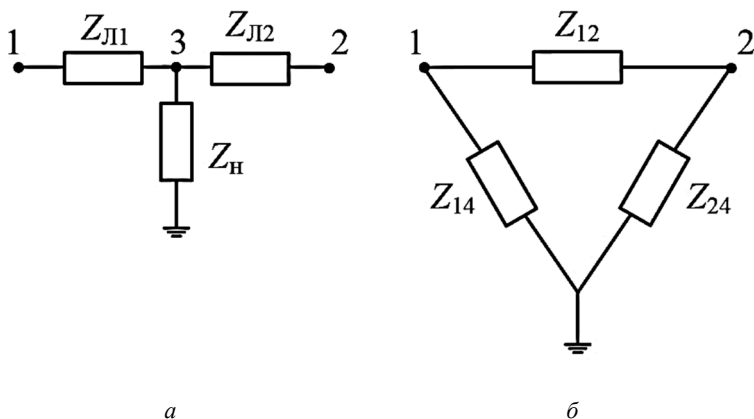


Рис. 5.24. Преобразование схемы замещения электропередачи

$$Z_{12} = Z_{\text{Л1}} + Z_{\text{Л2}} + \frac{Z_{\text{Л1}}Z_{\text{Л2}}}{Z_{\text{H}}} = 3,75 + j21 + 3,84 + j17,6 + \\ + \frac{(3,75 + j21) \cdot (3,84 + j17,6)}{569,3 + j142,6} = 7,06 + j39,0 \text{ Ом.}$$

$$Z_{14} = Z_{\text{Л1}} + Z_{\text{H}} + \frac{Z_{\text{Л1}}Z_{\text{H}}}{Z_{\text{Л2}}} = 3,75 + j21 + 569,3 + j142,6 + \\ + \frac{(3,75 + j21) \cdot (569,3 + j142,6)}{3,84 + j17,6} = 1240,3 + j358,0 \text{ Ом.}$$

$$Z_{24} = Z_{\text{Л2}} + Z_{\text{H}} + \frac{Z_{\text{Л2}}Z_{\text{H}}}{Z_{\text{Л1}}} = 3,84 + j17,6 + 569,3 + j142,6 + \\ + \frac{(3,84 + j17,6) \cdot (569,3 + j142,6)}{3,75 + j21} = 1058,1 + j262,2 \text{ Ом.}$$

Исходя из понятия собственной и взаимной проводимостей, по рис. 5.24, б определим их значение:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{14}} = \frac{1}{7,06 + j39,0} + \frac{1}{1240,3 + j358,0} = \\ = (5,24 - j25,0) \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{24}} = \frac{1}{7,06 + j39,0} + \frac{1}{1058,1 + j262,2} = \\ = (5,39 - j25,1) \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{1}{7,06 + j39,0} = (4,50 - j24,8) \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Вычислим модули собственных и взаимных проводимостей и углы, дополняющие аргументы собственных и взаимных сопротивлений до 90° :

$$Y_{11} = \sqrt{5,24^2 + 25^2} \cdot 10^{-3} = 0,0256 \text{ См.}$$

$$Y_{22} = \sqrt{5,39^2 + 25,1^2} \cdot 10^{-3} = 0,0256 \text{ См.}$$

$$Y_{12} = \sqrt{4,5^2 + 24,8^2} \cdot 10^{-3} = 0,0252 \text{ См.}$$

$$\alpha_{11} = -\arctg \frac{5,24}{-25} = 11,8^\circ.$$

$$\alpha_{22} = -\arctg \frac{5,39}{-25,1} = 12,1^\circ.$$

$$\alpha_{12} = -\arctg \frac{4,5}{-24,8} = 10,3^\circ.$$

Обратите внимание: угол аргумента проводимости противоположен по знаку углу аргумента сопротивления, поэтому при расчете угла аргумента сопротивления по активной и реактивной составляющим проводимости меняем знак у результата на противоположный. Поскольку определяем углы, дополняющие аргументы сопротивлений до 90° , то они определяются через соотношение активной составляющей к реактивной (углы аргументов сопротивлений определяются через соотношение реактивной составляющей к активной).

Определив собственные и взаимные проводимости, перейдем к расчету параметров режима электропередачи при заданных значениях P_1 , U_1 и U_2 . Для этого определим угол δ_{12} между векторами напряжений U_1 и U_2 :

$$\begin{aligned} \delta_{12} &= \arcsin \left(\frac{P_1 - U_1^2 Y_{11} \sin \alpha_{11}}{U_1 U_2 Y_{12}} \right) + \alpha_{12} = \\ &= \arcsin \left(\frac{250 - 242^2 \cdot 0,0256 \cdot \sin 11,8}{242 \cdot 230 \cdot 0,0252} \right) + 10,3 = 7,99^\circ. \end{aligned}$$

Зная значение угла δ_{12} , можно рассчитать значения P_2 , Q_2 и Q_1 :

$$Q_1 = 242^2 \cdot 0,0256 \cdot \cos 11,8 - 242 \cdot 230 \cdot 0,0252 \cdot \cos(7,99 - 10,3) = \\ = 66,1 \text{ Мвар};$$

$$P_2 = -230^2 \cdot 0,0256 \cdot \sin 12,1 + 242 \cdot 230 \cdot 0,0252 \cdot \sin(7,99 + 10,3) = \\ = 156,3 \text{ МВт};$$

$$Q_2 = -230^2 \cdot 0,0256 \cdot \cos 12,1 + 242 \cdot 230 \cdot 0,0252 \cdot \cos(7,99 + 10,3) = \\ = 7,62 \text{ Мвар}.$$

Для определения напряжения на шинах высшего напряжения ПС (U_3) применим метод расчета по заданным параметрам в начале радиальной линии.

Продольная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\Delta U_{13} = \frac{P_1 R_{\text{ли}} + Q_1 X_{\text{ли}}}{U_1} = \frac{250 \cdot 3,75 + 66,1 \cdot 21}{242} = 9,61 \text{ кВ}.$$

Поперечная составляющая вектора падения напряжения на сопротивлении линии:

$$\delta U_{13} = \frac{P_1 X_{\text{ли}} - Q_1 R_{\text{ли}}}{U_1} = \frac{250 \cdot 21 - 66,1 \cdot 3,75}{242} = 20,7 \text{ кВ}.$$

Напряжение на шинах высшего напряжения ПС U_3 :

$$U_3 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{13})^2 + (\delta U_{13})^2} = \\ = \sqrt{(242 - 9,61)^2 + (20,7)^2} = 233,3 \text{ кВ}.$$

6. КОМПЛЕКСНЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

6.1. Постановка задачи

Источником питания рассматриваемой сети (рис. 6.1) являются шины 220 кВ узловой подстанции ПС А 500/220 кВ, входящей в состав электроэнергетической системы. Напряжение на этих шинах (U_A) поддерживаются с помощью устройства РПН.

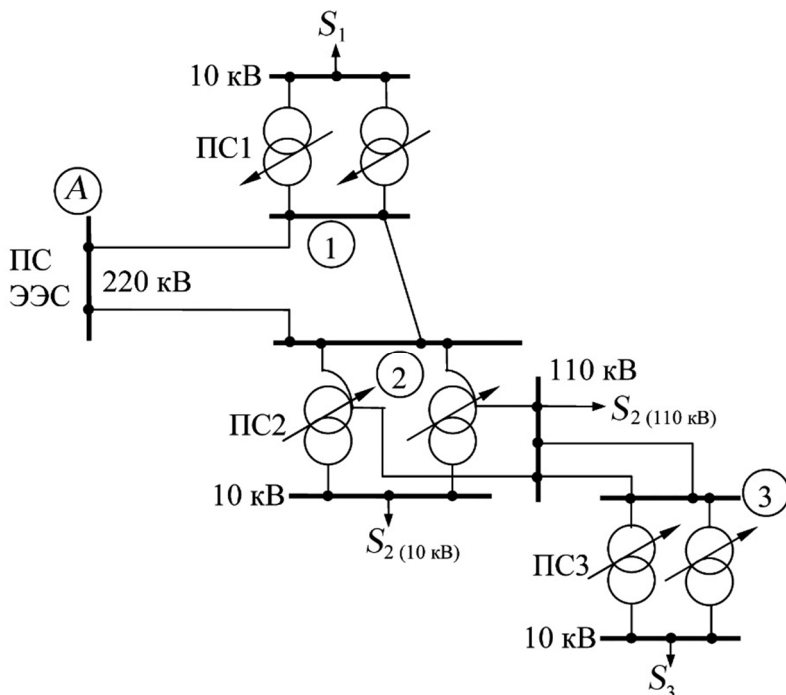


Рис. 6.1. Принципиальная схема сети

По кольцевой сети 220 кВ получают питание две понижающие двухтрансформаторные подстанции: ПС 1 220/10 кВ с нагрузкой на шинах 10 кВ $P_{нб1}$, $\cos\varphi_{нб1}$ и ПС 2 220/110/10 кВ с нагрузкой

на шинах 10 кВ $P_{н62(10кВ)}$, $\cos\varphi_{н62(10кВ)}$. Шины 110 кВ ПС 2 являются источником питания сети 110 кВ, которая представлена понижающей двухтрансформаторной подстанцией ПС 3 110/10 кВ с нагрузкой на шинах 10 кВ $P_{н63}$, $\cos\varphi_{н63}$ и обобщенной нагрузкой на шинах 110 кВ ПС 2 $P_{н62(110кВ)}$, $\cos\varphi_{н62(110кВ)}$.

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ между ПС А и ПС 1 и 2 (ЛЭП А1, 12, А2) длиной соответственно $L_{А1}$, L_{12} , $L_{А2}$ сооружены на железобетонных опорах с проводами марки указанными в исходных данных со среднегеометрическим расстоянием между фазами одной цепи $D_{сг 220} = 8$ м, линия 110 кВ (ЛЭП 23) – L_{23} , $D_{сг 110} = 5$ м.

Исходные данные по линиям и трансформаторам приведены в табл. 6.1 и 6.2:

Таблица 6.1

Данные по ветвям

Ветви	А-1	А-2	1-2
Длина, км	33	43	28
Марка провода	АС 300/39	АС 400/51	АС 240/32

Таблица 6.2

Данные по узлам

Узел (ПС)	1	2 (10 кВ)	2 (110 кВ)	3
Марка трансформатора	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-1250000/220/110		ТРДН-40000/110
$P_{нб}$, МВт	80	65	20	50
$\cos\varphi_{нб}$	0,93	0,90	0,94	0,92

Напряжение $U_A = 246$ кВ.

Необходимо:

1. Составить схему замещения сети и определить ее параметры:

- включая расчет погонных параметров линий;
- расчет параметров схем замещения линий;
- расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов;

- составление схемы замещения сети;
- определение расчетных нагрузок в узлах схемы.

2. Выполнить расчеты потокораспределения и напряжений в узлах сети в нормальном режиме работы сети (в режиме наибольших нагрузок).

3. Выполнить расчеты потокораспределения и напряжений в узлах сети в послеаварийном режиме работы сети (отключение наиболее загруженной линии кольцевой сети 220 кВ).

6.2. Расчет параметров схем замещения линий

Приведем схему замещения воздушной линии 110–220 кВ (рис. 6.2).

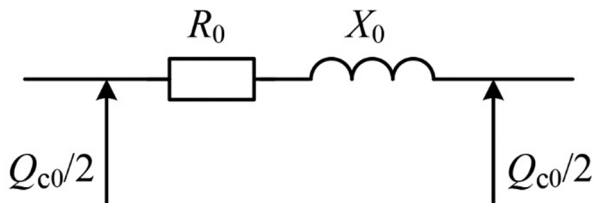


Рис. 6.2. Схема замещения воздушной линии 110–220 кВ

Приведем пример расчета для линии 12. По справочным данным для провода марки АС240/32 определяем удельное активное сопротивление: $R_0 = 0,118 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ и диаметр провода $d_{\text{пр}} = 21,6 \text{ мм}$.

Удельное индуктивное сопротивление:

$$X_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}220}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157 =$$

$$= 0,1445 \cdot \lg \frac{8000[\text{мм}]}{\frac{21,6}{2}[\text{мм}]} + 0,0157 = 0,43 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

Удельная емкостная проводимость:

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср}220}}{r_{\text{пр}}}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{8000[\text{мм}]}{\frac{21,6}{2}[\text{мм}]}} = 2,641 \cdot 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}.$$

Удельная зарядная мощность линии:

$$Q_{\text{с0}} = U_{\text{ном}}^2 \cdot B_0 = 220^2 \cdot 2,641 \cdot 10^{-6} = 0,128 \frac{\text{Мвар}}{\text{км}}.$$

Для остальных линий расчет выполняется аналогично, результаты расчетов сведены в табл. 6.3.

Приведем пример расчета для линии А1.

Полное активное сопротивление линии:

$$R_{\text{л}} = \frac{R_0 \cdot L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,118 \cdot 28}{1} = 3,304 \text{ Ом}.$$

Полное индуктивное сопротивление линии:

$$X_{\text{л}} = \frac{X_0 \cdot L}{n_{\text{ц}}} = \frac{0,43 \cdot 28}{1} = 12,05 \text{ Ом}.$$

Половина зарядной мощности линии:

$$\frac{Q_{\text{сл}}}{2} = \frac{U_{\text{ном}}^2 \cdot B_0 \cdot L \cdot n_{\text{ц}}}{2} =$$

$$= \frac{220^2 \cdot 2,641 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \cdot 1}{2} = 1,79 \text{ Мвар}.$$

Для остальных линий расчет выполняется аналогично, результаты расчетов сведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Параметры схемы замещения линий электропередачи

ЛЭП (ветвь)	$U_{ном}, \text{кВ}$	$n_{л}$	$L, \text{км}$	Марка провода	Погонные параметры				Расчетные данные		
					$R_0, \text{Ом/км}$	$X_0, \text{Ом/км}$	$B_0, \text{мкСм/км}$	$Q_{CO}, \text{квар/км}$	$R_{л}, \text{Ом}$	$X_{л}, \text{Ом}$	$Q_{CO}/2, \text{Мвар}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A1	220	1	33	АС 300/39	0,096	0,424	2,684	0,130	3,168	13,984	2,144
A2	220	1	43	АС 400/51	0,073	0,415	2,742	0,133	3,139	17,854	2,853
12	220	1	28	АС 240/32	0,118	0,430	2,641	0,128	3,304	12,050	1,79
23	110	2	23	АС 150/24	0,204	0,416	2,739	0,033	2,346	4,779	0,762

6.3. Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов

Приведем схему замещения двухобмоточного трансформатора (рис. 6.3).

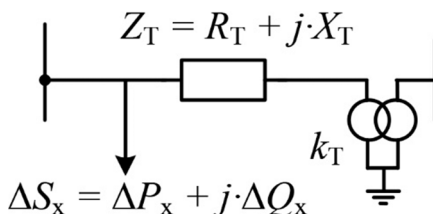


Рис. 6.3. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Приведем пример расчета для трансформаторов марки ТРДН-40000/110, установленных на подстанции 3. Для вычисления расчетных параметров схемы замещения трансформаторов используем паспортные данные трансформатора:

$$S_{\text{ТНОМ}} = 40 \text{ МВА};$$

$$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$\Delta P_{\text{к}} = 172 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{к}\%} = 10,5\%;$$

$$\Delta P_{\text{x}} = 36 \text{ кВт};$$

$$I_{\text{x}\%} = 0,65\%.$$

Активное сопротивление двух параллельно работающих трансформаторов:

$$R_{\text{т}} = \frac{1}{n_{\text{т}}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{172 \cdot 10^{-3} \cdot 115^2}{40^2} = 0,711 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление двух параллельно работающих трансформаторов:

$$X_{\text{т}} = \frac{1}{n_{\text{т}}} \cdot \frac{U_{\text{к}\%}}{100 \%} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,5 \%}{100 \%} \cdot \frac{115^2}{40} = 17,358 \text{ Ом}.$$

Потери активной мощности холостого хода двух параллельно работающих трансформаторов:

$$\Delta P_{\text{x}} = n_{\text{т}} \cdot \Delta P_{\text{x}} = 2 \cdot 36 = 72 \text{ кВт} = 0,072 \text{ МВт}.$$

Потери реактивной мощности холостого хода двух параллельно работающих трансформаторов:

$$\Delta Q_x = n_t \cdot \frac{I_{x\%}}{100 \%} \cdot S_{\text{тном}} = 2 \cdot \frac{0,65 \%}{100 \%} \cdot 40 = 0,52 \text{ Мвар} .$$

Для остальных трансформаторов расчет выполняется аналогично, результаты расчетов сведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Параметры схемы замещения трансформаторов

ПС (узел)	Каталожные данные							Расчетные данные			
	$S_{\text{ном}}$, МВА	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	U_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %	R_t , Ом	X_t , Ом	ΔP_x , МВт	ΔQ_x , Мвар
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	63	230	11	12	300	82	0,8	1,999	50,381	0,164	1,008
3	40	115	10,5	10,5	172	36	0,65	0,711	17,358	0,072	0,52

Приведем схему замещения автотрансформатора (рис. 6.4).

Выпишем паспортные данные автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110:

$$S_{\text{тном}} = 125 \text{ МВА};$$

$$U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}; U_{\text{СН}} = 121 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 11 \text{ кВ};$$

$$\Delta P_{\text{к в-с}} = 305 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{к в-н}\%} = 45 \% ; U_{\text{к в-с}\%} = 11 \% ; U_{\text{к с-н}\%} = 28 \% ;$$

$$\Delta P_x = 65 \text{ кВт};$$

$$I_{x\%} = 0,5 \% .$$

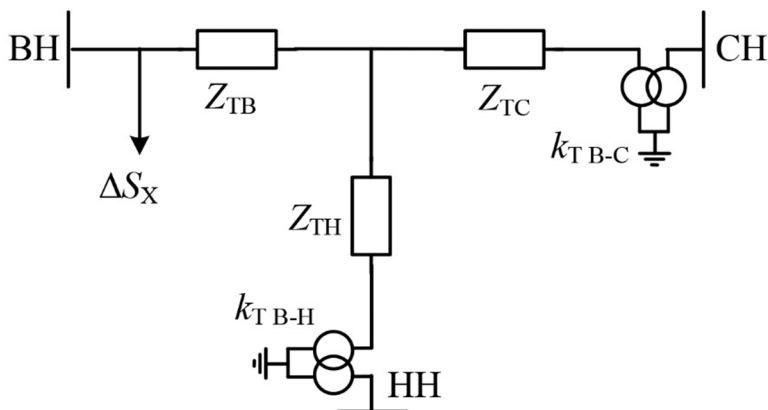


Рис. 6.4. Схема замещения автотрансформатора

Мощность обмотки НН равна 50% от номинальной.

Активное сопротивление лучей двух параллельно работающих автотрансформаторов:

$$R_{TB} = R_{TC} = \frac{1}{n_T} \cdot \frac{\Delta P_{KB-C}}{2} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_{THOM}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{305 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{230^2}{125^2} = 0,258 \text{ Ом.}$$

В силу того, что мощность обмотки НН составляет 0,5 от номинальной:

$$R_{TH} = 2 \cdot R_{TB} = 2 \cdot 0,258 = 0,516 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление лучей двух параллельно работающих автотрансформаторов:

$$\begin{aligned} \Delta U_{KB\%} &= 0,5 \cdot (\Delta U_{KB-C\%} + \Delta U_{KB-H\%} - \Delta U_{KC-H\%}) = \\ &= 0,5 \cdot (11\% + 45\% - 28\%) = 14\%, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{KC\%} &= 0,5 \cdot (\Delta U_{KB-C\%} + \Delta U_{KC-H\%} - \Delta U_{KB-H\%}) = \\ &= 0,5 \cdot (11\% + 28\% - 45\%) = -3\%, \end{aligned}$$

$$\Delta U_{KC\%} = 0\%,$$

$$\Delta U_{\text{кн}\%} = 0,5 \cdot (\Delta U_{\text{кв-н}\%} + \Delta U_{\text{кч-н}\%} - \Delta U_{\text{кв-ч}\%}) =$$

$$= 0,5 \cdot (45\% + 28\% - 11\%) = 31\%,$$

$$X_{\text{тв}} = \frac{1}{n_{\text{т}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{кв}\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14\%}{100\%} \cdot \frac{230^2}{125} = 29,624 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{тс}} = \frac{1}{n_{\text{т}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{кч}\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0\%}{100\%} \cdot \frac{230^2}{125} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{тн}} = \frac{1}{n_{\text{т}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{кн}\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{31\%}{100\%} \cdot \frac{230^2}{125} = 65,596 \text{ Ом}.$$

Потери активной мощности холостого хода двух параллельно работающих трансформаторов:

$$\Delta P_{\text{х}} = n_{\text{т}} \cdot \Delta P_{\text{х}} = 2 \cdot 65 = 130 \text{ кВт} = 0,13 \text{ МВт}.$$

Потери реактивной мощности холостого хода двух параллельно работающих трансформаторов:

$$\Delta Q_{\text{х}} = n_{\text{т}} \cdot \frac{I_{\text{х}\%}}{100\%} \cdot S_{\text{тном}} = 2 \cdot \frac{0,5\%}{100\%} \cdot 125 = 1,25 \text{ Мвар}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Параметры схемы замещения автотрансформаторов

	ПС (узел)	$S_{\text{ном}}$, МВА	Каталожные данные								Расчетные данные								
			$U_{\text{вн}}$, кВ	$U_{\text{сн}}$, кВ	$U_{\text{нн}}$, кВ	$\Delta P_{\text{к}}$, кВт	$\Delta P_{\text{х}}$, кВт	$I_{\text{с}}$, %	$U_{\text{к}}$, %	$U_{\text{с}}$, %	$U_{\text{х}}$, %	$R_{\text{т2к}}$, Ом	$R_{\text{т2с}}$, Ом	$R_{\text{т2н}}$, Ом	$X_{\text{т2к}}$, Ом	$X_{\text{т2с}}$, Ом	$X_{\text{т2н}}$, Ом	$\Delta P_{\text{х2}}$, МВт	$\Delta Q_{\text{х2}}$, Мвар
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
125			230	121	11	305	65	0,5	11	45	28	0,258	0,258	0,516	29,62	0	65,59	0,13	1,25

6.4. Составление схемы замещения сети

Схема замещения сети с указанием расчетных параметров ветвей (линий и трансформаторов) и параметров нагрузок ($P_n + j \cdot Q_n$) представлена на рис. 6.5.

Перейдем к определению расчетных нагрузок в узлах схемы. Приведем пример расчета для линии подстанции 3. Определим реактивную мощность нагрузки:

$$Q_n = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n = 50 \cdot 0,426 = 21,3 \text{ Мвар}.$$

Определим потери мощности в обмотках трансформатора:

$$\begin{aligned} \Delta S_T &= \frac{S_n^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_T = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_T = \\ &= \frac{50^2 + 21,3^2}{110^2} \cdot (0,711 + j \cdot 17,358) = 0,174 + j \cdot 4,237 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Приведенная нагрузка:

$$\begin{aligned} S_{\text{прив}} &= S_n + \Delta S_T + \Delta S_x = \\ &= 50 + j \cdot 21,3 + 0,174 + j \cdot 4,237 + 0,072 + j \cdot 0,52 = \\ &= 50,246 + j \cdot 26,057 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Расчетная нагрузка:

$$\begin{aligned} S_p &= S_{\text{прив}} - j \cdot \frac{Q_{c23}}{2} = 50,246 + j \cdot 26,057 - j \cdot 0,762 = \\ &= 50,246 + j \cdot 25,295 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Расчетная схема сети для нормального режима с указанием расчетных нагрузок ($P_p + j \cdot Q_p$) представлена на рис. 6.6. На расчетной схеме обозначим потоки мощности, протекающие по линиям электропередачи и обмоткам автотрансформаторов, и напряжения в узлах схемы.

Для подстанции 1 расчет выполняется аналогично, результаты расчетов сведены в табл. 6.6.

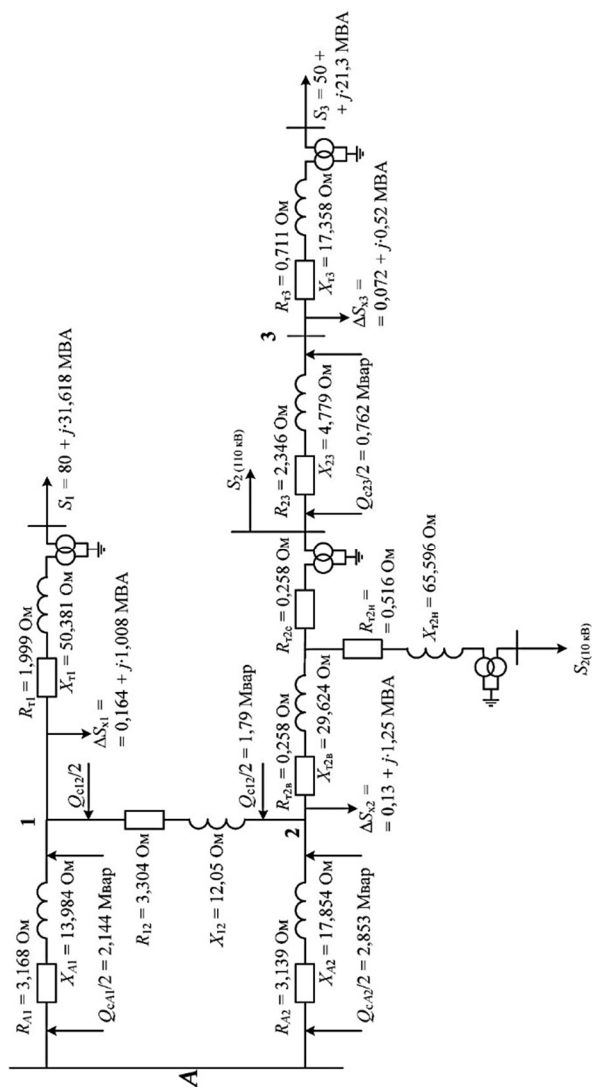


Рис. 6.5. Схема замещения сети

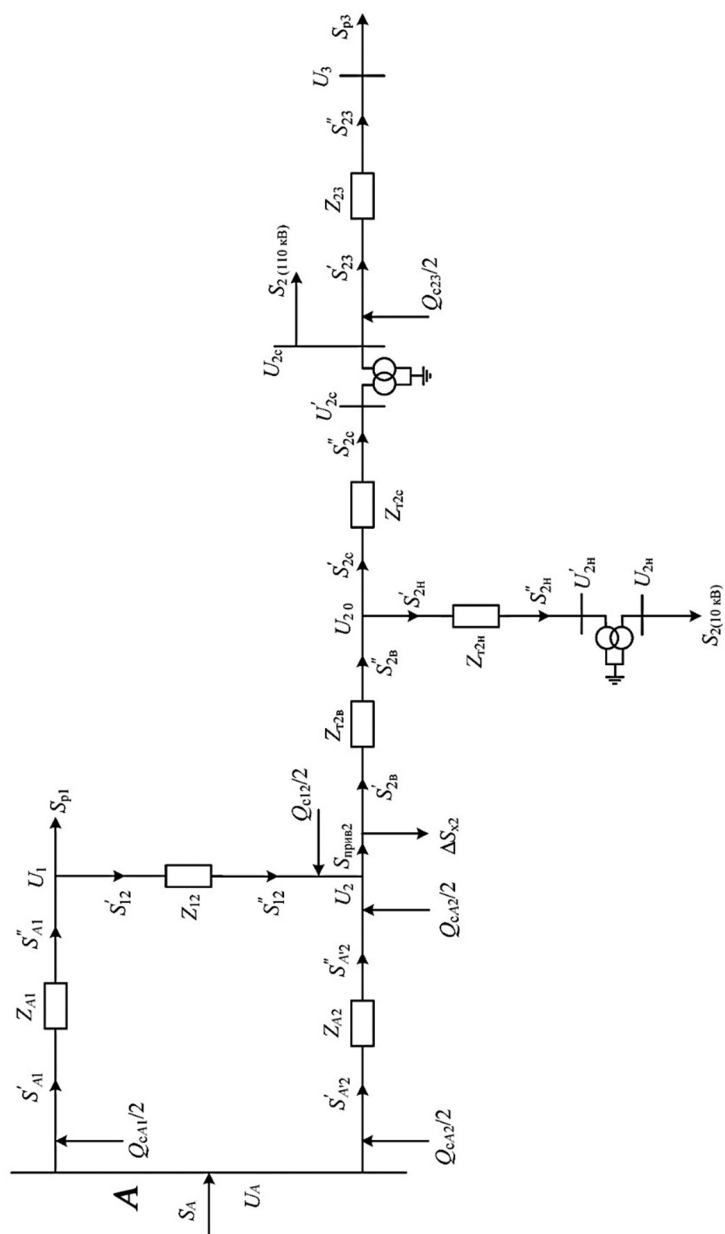


Рис. 6.6. Расчетная схема сети

Таблица 6.6

**Приведенные и расчетные нагрузки подстанций
в нормальном режиме**

Узел	P_n , МВт	ΔP_{Γ} , МВт	ΔP_{Σ} , МВт	P_p , МВт	Q_n , Мвар	ΔQ_{Γ} , Мвар	ΔQ_{Σ} , Мвар	$\Delta Q_{c/2}$, Мвар	Q_p , Мвар
1	80	0,306	0,164	80,47	31,618	7,703	1,008	3,934	36,395
3	50	0,174	0,072	50,246	21,3	4,237	0,52	0,762	25,295

**6.5. Расчет потокораспределения в ветвях
и напряжений в узлах сети в нормальном режиме**

Расчет сети 110 кВ.

1 этап: $U_3 = U_{\text{ном}} = 110$ кВ.

Мощность в конце линии 23:

$$S_{23}'' = S_{p3} = 50,246 + j \cdot 25,295 \text{ МВА}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии 23:

$$\begin{aligned} \Delta S_{23} &= \frac{(S_{23}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{23} = \frac{(50,246)^2 + (25,295)^2}{110^2} \cdot (2,346 + j \cdot 4,779) = \\ &= 0,614 + j \cdot 1,25 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 23:

$$\begin{aligned} S_{23}' &= S_{23}'' + \Delta S_{23} = 50,246 + j \cdot 25,295 + 0,614 + j \cdot 1,25 = \\ &= 50,859 + j \cdot 26,544 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Расчет автотрансформатора.

1 этап: $U_{2н}' = U_{2с}' = U_{20}' = U_{\text{ном}} = 220$ кВ.

Луч среднего напряжения.

Определим реактивную мощность $Q_{2(110 \text{ кВ})}$:

$$Q_{2(110 \text{ кВ})} = P_{2(110 \text{ кВ})} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{2(110 \text{ кВ})} = 20 \cdot 0,363 = 7,259 \text{ Мвар}.$$

Мощность в конце луча среднего напряжения:

$$\begin{aligned} S_{2c}'' &= S_{23}' - j \cdot \frac{Q_{c23}}{2} + S_{2(110\text{кВ})} = \\ &= 50,859 + j \cdot 26,544 - j \cdot 0,762 + 20 + j \cdot 7,259 = \\ &= 70,859 + j \cdot 33,041 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Потери мощности в луче среднего напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta S_{2c} &= \frac{(S_{2c}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{\tau 2c} = \\ &= \frac{(70,859)^2 + (33,041)^2}{220^2} \cdot (0,258 + j \cdot 0) = 0,033 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Мощность в начале луча среднего напряжения:

$$\begin{aligned} S_{2c}' &= S_{2c}'' + \Delta S_{2c} = 70,859 + j \cdot 33,041 + 0,033 = \\ &= 70,892 + j \cdot 33,041 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Луч низкого напряжения.

Мощность в конце луча низкого напряжения:

$$Q_{2(10\text{кВ})} = P_{2(10\text{кВ})} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{2(10\text{кВ})} = 65 \cdot 0,484 = 31,481 \text{ Мвар.}$$

$$S_{2н}'' = P_{2(10\text{кВ})} + j \cdot Q_{2(10\text{кВ})} = 65 + j \cdot 31,481 \text{ МВА.}$$

Потери мощности в обмотке низкого напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta S_{2н} &= \frac{(S_{2н}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{\tau 2н} = \frac{(65)^2 + (31,481)^2}{220^2} \cdot (0,516 + j \cdot 65,596) = \\ &= 0,056 + j \cdot 7,069 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Мощность в начале луча низкого напряжения:

$$\begin{aligned} S'_{2н} &= S''_{2н} + \Delta S_{2н} = 65 + j \cdot 31,481 + 0,056 + j \cdot 7,069 = \\ &= 65,056 + j \cdot 38,55 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Луч высокого напряжения.

Мощность в конце луча высокого напряжения:

$$\begin{aligned} S''_{2в} &= S'_{2с} + S'_{2н} = 70,892 + j \cdot 33,041 + 65,056 + j \cdot 38,55 = \\ &= 135,947 + j \cdot 71,591 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Потери мощности в луче высокого напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta S_{2в} &= \frac{(S''_{2в})^2}{U_{ном}^2} \cdot Z_{т2в} = \frac{(135,947)^2 + (71,591)^2}{220^2} \cdot (0,258 + j \cdot 29,624) = \\ &= 0,126 + j \cdot 14,449 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Мощность в начале луча высокого напряжения:

$$\begin{aligned} S'_{2в} &= S''_{2в} + \Delta S_{2в} = 135,947 + j \cdot 71,591 + 0,126 + j \cdot 14,449 = \\ &= 136,073 + j \cdot 86,04 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Приведенная нагрузка подстанции 2:

$$\begin{aligned} S_{прив2} &= S'_{2в} + \Delta S_{х2} = 136,073 + j \cdot 86,04 + 0,13 + j \cdot 1,25 = \\ &= 136,203 + j \cdot 87,29 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Расчетная нагрузка подстанции 2:

$$\begin{aligned} S_{п2} &= S_{прив2} - j \cdot \left(\frac{Q_{с\Lambda 2}}{2} + \frac{Q_{с12}}{2} \right) = \\ &= 136,203 + j \cdot 87,29 - j \cdot (2,853 + 1,79) = \\ &= 136,203 + j \cdot 82,648 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Расчет кольцевой сети 220 кВ.

Разомкнем кольцевую сеть $A-1-2-A$ по шинам источника питания A и представим исходную кольцевую сеть как сеть с двумя источниками питания A и A' (рис. 6.6).

Произвольно зададимся положительными направлениями мощностей в линиях сети (рис. 6.7).

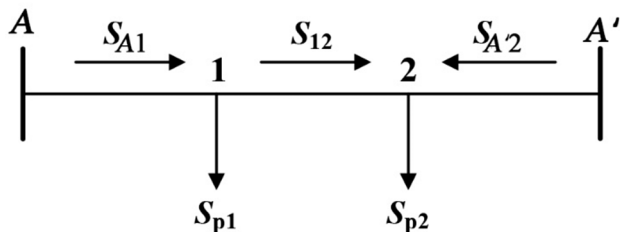


Рис. 6.7. Схема кольцевой сети, разомкнутой по шинам источника питания

Рассчитаем предварительное потокораспределение в сети (без учета потерь мощности).

Потоки мощности на головных участках сети:

$$\begin{aligned}
 S_{A1} &= \frac{S_{p1} \cdot \left(\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2} \right) + S_{p2} \cdot \left(\hat{Z}_{A2} \right)}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} = \\
 &= \frac{(80,47 + j36,395) \cdot (3,304 - j12,05 + 3,139 - j17,854) + (136,203 + j82,648) \cdot (3,139 - j17,854)}{3,168 - j13,984 + 3,304 - j12,05 + 3,139 - j17,854} = \\
 &= 111,167 + j55,631 \text{ MBA.} \\
 S_{A2} &= \frac{S_{p1} \cdot \left(\hat{Z}_{A1} \right) + S_{p2} \cdot \left(\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} \right)}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} = \\
 &= \frac{(80,47 + j36,395) \cdot (3,168 - j13,984) + (136,203 + j82,648) \cdot (3,168 - j13,984 + 3,304 - j12,05)}{3,168 - j13,984 + 3,304 - j12,05 + 3,139 - j17,854} = \\
 &= 105,506 + j \cdot 63,412 \text{ MBA.}
 \end{aligned}$$

Проверка вычислений мощностей на головных участках сети:

$$S_{A1} + S_{A2} = 111,167 + j \cdot 55,631 + 105,506 + j \cdot 63,412 = \\ = 216,673 + j \cdot 119,043 \text{ МВА.}$$

$$S_{p1} + S_{p2} = 80,47 + j \cdot 36,395 + 136,203 + j \cdot 82,648 = \\ = 216,673 + j \cdot 119,043 \text{ МВА.}$$

Баланс мощности выполняется.

Поток мощности на оставшемся участке 12:

$$S_{12} = S_{A1} - S_{p1} = 111,167 + j \cdot 55,631 - (80,47 + j \cdot 36,395) = \\ = 30,697 + j \cdot 19,236 \text{ МВА.}$$

Полученные потоки мощности положительны, поэтому предварительно выбранные направления мощностей верны. Следовательно, точка потоко раздела – точка 2.

Разрезаем кольцевую сеть на две радиально-магистральные по точке потоко раздела (рис. 6.8).

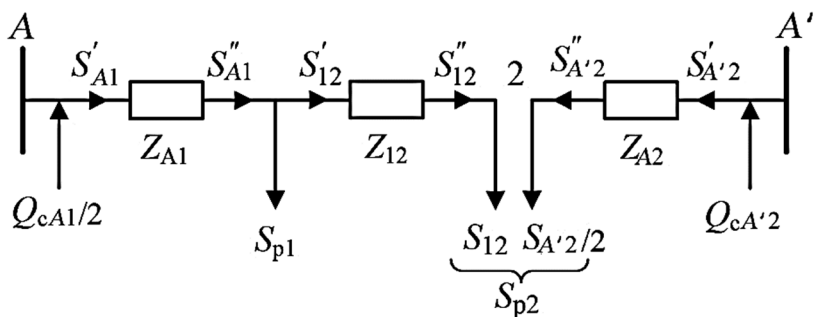


Рис. 6.8. Расчетная схема кольцевой сети разомкнутой по точке потоко раздела

1 этап: $U_1 = U_2 = U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$.

Мощность в конце линии 12:

$$S_{12}'' = S_{12} = 30,697 + j \cdot 19,236 \text{ МВА}.$$

Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned} \Delta S_{12} &= \frac{(S_{12}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{12} = \frac{(30,697)^2 + (19,236)^2}{220^2} \cdot (3,304 + j \cdot 12,05) = \\ &= 0,09 + j \cdot 0,327 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 12:

$$\begin{aligned} S_{12}' &= S_{12}'' + \Delta S_{12} = 30,697 + j \cdot 19,236 + 0,09 + j \cdot 0,327 = \\ &= 30,787 + j \cdot 19,563 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в конце линии A1:

$$\begin{aligned} S_{A1}'' &= S_{12}' + S_{p1} = 30,787 + j \cdot 19,563 + 80,47 + j \cdot 36,395 = \\ &= 111,257 + j \cdot 55,958 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Потери мощности в сопротивлении линии A1:

$$\begin{aligned} \Delta S_{A1} &= \frac{(S_{A1}'')^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{A1} = \frac{(111,257)^2 + (55,958)^2}{220^2} \cdot (3,168 + j \cdot 13,984) = \\ &= 1,015 + j \cdot 4,481 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии A1:

$$\begin{aligned} S_{A1}' &= S_{A1}'' + \Delta S_{A1} = 111,257 + j \cdot 55,958 + 1,015 + j \cdot 4,481 = \\ &= 112,272 + j \cdot 60,439 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в конце линии $A2$:

$$S''_{A2} = S_{A2} = 105,506 + j \cdot 63,412 \text{ МВА} .$$

Потери мощности в сопротивлении линии $A2$:

$$\begin{aligned} \Delta S_{A2} &= \frac{(S''_{A2})^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{A2} = \frac{(105,506)^2 + (63,412)^2}{220^2} \cdot (3,139 + j \cdot 17,854) = \\ &= 0,983 + j \cdot 5,59 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность в начале линии $A2$:

$$\begin{aligned} S'_{A2} &= S''_{A2} + \Delta S_{A2} = 105,506 + j \cdot 63,412 + 0,983 + j \cdot 5,59 = \\ &= 106,489 + j \cdot 69,001 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Мощность источника питания:

$$\begin{aligned} S_A &= S'_{A1} + S'_{A2} - j \cdot \left(\frac{Q_{cA1}}{2} + \frac{Q_{cA2}}{2} \right) = \\ &= 112,272 + j60,439 + 106,489 + j69,001 - j(2,144 + 2,853) = \\ &= 218,76 + j124,443 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

2 этап. Определим напряжение U_1 и U_2 .

Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии $A1$:

$$\begin{aligned} \Delta U_{A1} &= \frac{P'_{A1} \cdot R_{A1} + Q'_{A1} \cdot X_{A1}}{U_A} = \\ &= \frac{112,272 \cdot 3,168 + 60,439 \cdot 13,984}{246} = 4,881 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии A1:

$$\begin{aligned}\delta U_{A1} &= \frac{P'_{A1} \cdot X_{A1} - Q'_{A1} \cdot R_{A1}}{U_A} = \\ &= \frac{112,272 \cdot 13,984 - 60,439 \cdot 3,168}{246} = 5,604 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжение в точке 1:

$$\begin{aligned}U_1 &= \sqrt{(U_A - \Delta U_{A1})^2 + (\delta U_{A1})^2} = \\ &= \sqrt{(246 - 4,881)^2 + (5,604)^2} = 241,184 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned}\Delta U_{12} &= \frac{P'_{12} \cdot R_{12} + Q'_{12} \cdot X_{12}}{U_1} = \\ &= \frac{30,787 \cdot 3,304 + 19,563 \cdot 12,05}{241,184} = 1,399 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned}\delta U_{12} &= \frac{P'_{12} \cdot X_{12} - Q'_{12} \cdot R_{12}}{U_1} = \\ &= \frac{30,787 \cdot 12,05 - 19,563 \cdot 3,304}{241,184} = 1,27 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжение в точке 2":

$$\begin{aligned}U_{2''} &= \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2} = \\ &= \sqrt{(241,184 - 1,399)^2 + (1,27)^2} = 239,788 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии A2:

$$\begin{aligned}\Delta U_{A2} &= \frac{P'_{A2} \cdot R_{A2} + Q'_{A2} \cdot X_{A2}}{U_A} = \\ &= \frac{106,489 \cdot 3,139 + 69,001 \cdot 17,854}{246} = 6,367 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии A2:

$$\begin{aligned}\delta U_{A2} &= \frac{P'_{A2} \cdot X_{A2} - Q'_{A2} \cdot R_{A2}}{U_A} = \\ &= \frac{106,489 \cdot 17,854 - 69,001 \cdot 3,139}{246} = 6,848 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжение в точке 2':

$$\begin{aligned}U_{2'} &= \sqrt{(U_A - \Delta U_{A2})^2 + (\delta U_{A2})^2} = \\ &= \sqrt{(246 - 6,367)^2 + (6,848)^2} = 239,731 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжение в точке 2:

$$U_2 = \frac{U_{2'} + U_{2''}}{2} = \frac{239,731 + 239,788}{2} = 239,759 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 1:

$$\begin{aligned}\Delta U_{\tau 1} &= \frac{(P_{\text{прив1}} - \Delta P_{x1}) \cdot R_{\tau 1} + (Q_{\text{прив1}} - \Delta Q_{x1}) \cdot X_{\tau 1}}{U_1} = \\ &= \frac{(80,47 - 0,164) \cdot 1,999 + (40,329 - 1,008) \cdot 50,381}{241,184} = 8,879 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 1:

$$\begin{aligned}\delta U_{т1} &= \frac{(P_{прив1} - \Delta P_{x1}) \cdot X_{т1} - (Q_{прив1} - \Delta Q_{x1}) \cdot R_{т1}}{U_1} = \\ &= \frac{(80,47 - 0,164) \cdot 50,381 - (40,329 - 1,008) \cdot 1,999}{241,184} = 16,449 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Значение напряжения на шинах низкого напряжения подстанции 1, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$\begin{aligned}U'_{1н} &= \sqrt{(U_1 - \Delta U_{т1})^2 + (\delta U_{т1})^2} = \\ &= \sqrt{(241,184 - 8,879)^2 + (16,449)^2} = 232,886 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Расчет автотрансформатора.

2 этап. Продольная составляющая падения напряжения в луче высокого напряжения:

$$\begin{aligned}\Delta U_{в0} &= \frac{P'_{2в} \cdot R_{т2в} + Q'_{2в} \cdot X_{т2в}}{U_2} = \\ &= \frac{136,073 \cdot 0,258 + 86,04 \cdot 29,624}{239,759} = 10,777 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче высокого напряжения:

$$\begin{aligned}\delta U_{в0} &= \frac{P'_{2в} \cdot X_{т2в} - Q'_{2в} \cdot R_{т2в}}{U_2} = \\ &= \frac{136,073 \cdot 29,624 - 86,04 \cdot 0,258}{239,759} = 16,72 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжения в средней точке автотрансформатора:

$$U_{20} = \sqrt{(U_2 - \Delta U_{в0})^2 + (\delta U_{в0})^2} = \\ = \sqrt{(239,759 - 10,777)^2 + (16,72)^2} = 229,592 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая падения напряжения в луче среднего напряжения:

$$\Delta U_{0с} = \frac{P'_{2с} \cdot R_{т2с} + Q'_{2с} \cdot X_{т2с}}{U_{20}} = \\ = \frac{70,892 \cdot 0,258 + 33,041 \cdot 0}{229,592} = 0,08 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче среднего напряжения:

$$\delta U_{0с} = \frac{P'_{2с} \cdot X_{т2с} - Q'_{2с} \cdot R_{т2с}}{U_{20}} = \\ = \frac{70,892 \cdot 0 - 33,041 \cdot 0,258}{229,592} = -0,037 \text{ кВ.}$$

Значение напряжения на шинах среднего напряжения, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$U'_{2с} = \sqrt{(U_{20} - \Delta U_{0с})^2 + (\delta U_{0с})^2} = \\ = \sqrt{(229,592 - 0,08)^2 + (-0,037)^2} = 229,512 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая падения напряжения в луче низкого напряжения:

$$\Delta U_{0н} = \frac{P'_{2н} \cdot R_{т2н} + Q'_{2н} \cdot X_{т2н}}{U_{20}} = \\ = \frac{65,056 \cdot 0,516 + 38,55 \cdot 65,596}{229,592} = 11,16 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче низкого напряжения:

$$\begin{aligned}\delta U_{0н} &= \frac{P'_{2н} \cdot X_{т2н} - Q'_{2н} \cdot R_{т2н}}{U_{20}} = \\ &= \frac{65,056 \cdot 65,596 - 38,55 \cdot 0,516}{229,592} = 18,5 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Значение напряжения на шинах низкого напряжения, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$\begin{aligned}U'_{2н} &= \sqrt{(U_{20} - \Delta U_{0н})^2 + (\delta U_{0н})^2} = \\ &= \sqrt{(229,592 - 11,16)^2 + (18,5)^2} = 219,213 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Для дальнейшего расчета режима сети среднего напряжения необходимо сначала определить напряжения на шинах СН. Примем, что коэффициент трансформации равен номинальному:

$$U_{2с} = \frac{U'_{2с} \cdot U_{сн}}{U_{вн}} = \frac{229,512 \cdot 121}{230} = 120,743 \text{ кВ}.$$

Расчет сети 110 кВ.

2 этап. Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 23:

$$\begin{aligned}\Delta U_{23} &= \frac{P'_{23} \cdot R_{23} + Q'_{23} \cdot X_{23}}{U_{2с}} = \\ &= \frac{50,859 \cdot 2,346 + 26,544 \cdot 4,779}{120,743} = 2,039 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Напряжение в точке 3:

$$U_3 = U_{2с} - \Delta U_{23} = 120,743 - 2,039 = 118,705 \text{ кВ}.$$

Продольная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 3:

$$\begin{aligned}\Delta U_{т3} &= \frac{(P_{прив3} - \Delta P_{х3}) \cdot R_{т3} + (Q_{прив3} - \Delta Q_{х3}) \cdot X_{т3}}{U_3} = \\ &= \frac{(50,246 - 0,072) \cdot 0,711 + (26,057 - 0,52) \cdot 17,358}{118,705} = 4,035 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Значение напряжение на шинах низкого напряжения подстанции 3, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$U'_{3н} = U_3 - \Delta U_{т3} = 118,705 - 4,035 = 114,67 \text{ кВ}.$$

6.6. Расчет потокораспределения в ветвях и напряжений в узлах сети в послеаварийном режиме

Согласно заданию необходимо рассмотреть один самый тяжелый послеаварийный режим в рассматриваемой сети – отключение наиболее загруженной линии кольцевой сети 220 кВ.

Из расчета нормального режима кольцевой сети 220 кВ известно (см. раздел 6.5):

$$S'_{A1} = 112,272 + j60,439 \text{ МВА};$$

$$|S'_{A1}| = \sqrt{112,272^2 + 60,439^2} = 127,5 \text{ МВА};$$

$$S'_{A2} = 106,489 + j69,001 \text{ МВА};$$

$$|S'_{A2}| = \sqrt{106,489^2 + 69,001^2} = 126,9 \text{ МВА}.$$

Получаем, что $|S'_{A1}| > |S'_{A2}|$. Следовательно, расчетным послеаварийным будет отключение линии A1. Расчетная схема нормального режима (см. рис. 6.6) трансформируется к расчетной схеме послеаварийного режима (рис. 6.9).

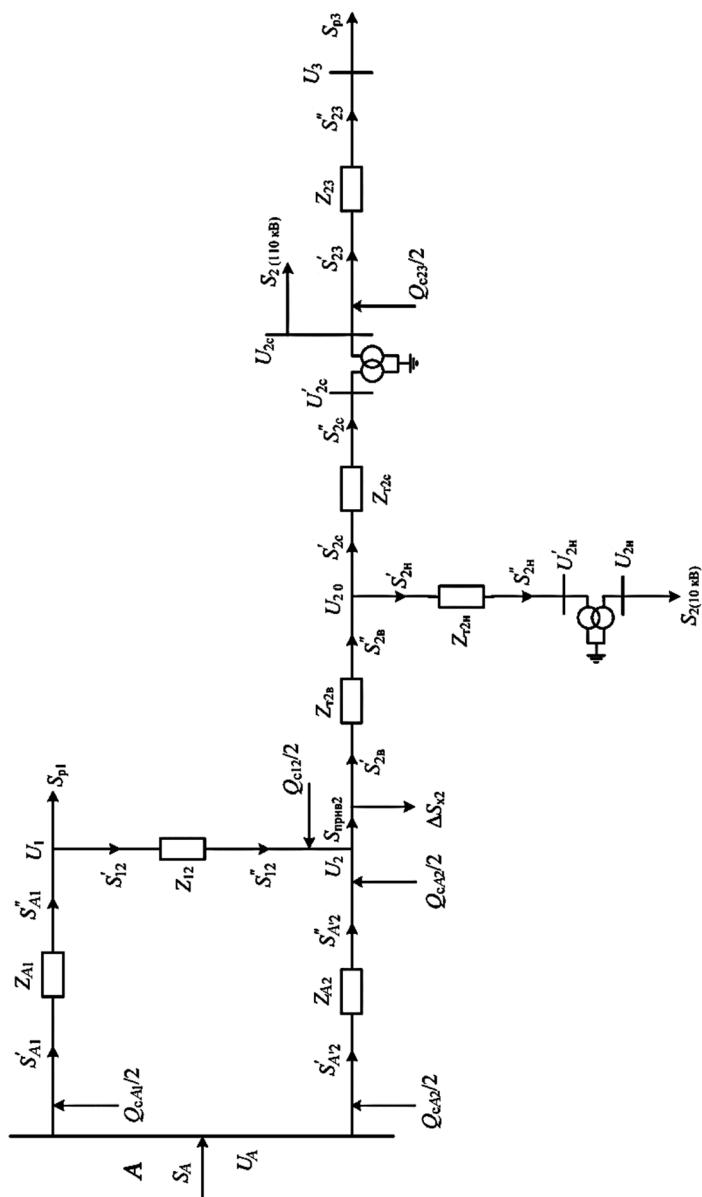


Рис. 6.9. Расчетная схема сети для послеварийного режима – отключении линии A1

Поскольку линия $A1$ отключена, то изменится значение расчетной нагрузки подстанции 1 (в схеме замещения отсутствует половина зарядной мощности линии $A1$):

$$S_{p1} = S_{\text{прив1}} - j \cdot \frac{Q_{c12}}{2} = 80,47 + j \cdot 40,329 - j \cdot 1,79 = \\ = 80,47 + j \cdot 38,539 \text{ МВА.}$$

Расчет 1-го этапа сети 110 кВ и автотрансформатора не изменится, так как в этой части схемы сети никаких изменений не было. Поэтому значение расчетной нагрузки подстанции 2 в послеаварийном режиме будет идентично значению в нормальном режиме:

$$S_{p2} = 136,203 + j \cdot 82,648 \text{ МВА.}$$

Расчет кольцевой сети 220 кВ.

1 этап: $U_1 = U_2 = U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$

Кольцевая сеть 220 кВ после отключения линии $A1$ превратилась в магистральную линию $A-2-1$ (рис. 6.10).

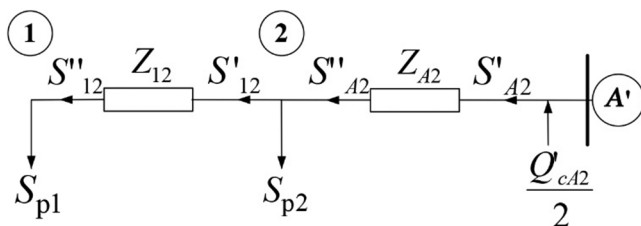


Рис. 6.10. Расчетная схема сети 220 кВ

Мощность в конце линии 12:

$$S''_{12} = S_{p1} = 80,47 + j \cdot 38,539 \text{ МВА.}$$

Потери мощности в сопротивлении линии 12:

$$\Delta S_{12} = \frac{(S''_{12})^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{12} = \frac{(80,47)^2 + (38,539)^2}{220^2} \cdot (3,304 + j \cdot 12,05) = 0,543 + j \cdot 1,982 \text{ МВА.}$$

Мощность в начале линии 12:

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 80,47 + j \cdot 38,539 + 0,543 + j \cdot 1,982 = 81,013 + j \cdot 40,521 \text{ МВА.}$$

Мощность в конце линии A2:

$$S''_{A2} = S'_{12} + S_{p2} = 81,013 + j \cdot 40,521 + 136,203 + j \cdot 82,648 = 217,216 + j \cdot 123,169 \text{ МВА.}$$

Потери мощности в сопротивлении линии A2:

$$\Delta S_{A2} = \frac{(S''_{A2})^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot Z_{A2} = \frac{(217,216)^2 + (123,169)^2}{220^2} \cdot (3,139 + j \cdot 17,854) = 4,044 + j \cdot 23,001 \text{ МВА.}$$

Мощность в начале линии A2:

$$S'_{A2} = S''_{A2} + \Delta S_{A2} = 217,216 + j \cdot 123,169 + 4,044 + j \cdot 23,001 = 221,26 + j \cdot 146,17 \text{ МВА.}$$

Мощность источника питания:

$$S_A = S'_{A2} - j \cdot \frac{Q_{cA2}}{2} = 221,26 + j \cdot 146,17 - j \cdot 2,853 = 221,26 + j \cdot 143,317 \text{ МВА.}$$

2 этап. Определим напряжение U_1 и U_2 .

Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии A2:

$$\begin{aligned}\Delta U_{A2} &= \frac{P'_{A2} \cdot R_{A2} + Q'_{A2} \cdot X_{A2}}{U_A} = \\ &= \frac{221,26 \cdot 3,139 + 146,17 \cdot 17,854}{246} = 13,432 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии A2:

$$\begin{aligned}\delta U_{A2} &= \frac{P'_{A2} \cdot X_{A2} - Q'_{A2} \cdot R_{A2}}{U_A} = \\ &= \frac{221,26 \cdot 17,854 - 146,17 \cdot 3,139}{246} = 14,193 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Напряжение в точке 2:

$$\begin{aligned}U_2 &= \sqrt{(U_A - \Delta U_{A2})^2 + (\delta U_{A2})^2} = \\ &= \sqrt{(246 - 13,432)^2 + (14,193)^2} = 232,003 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned}\Delta U_{12} &= \frac{P'_{12} \cdot R_{12} + Q'_{12} \cdot X_{12}}{U_2} = \\ &= \frac{80,47 \cdot 3,304 + 38,539 \cdot 12,05}{232,003} = 3,148 \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 12:

$$\begin{aligned}\delta U_{12} &= \frac{P'_{12} \cdot X_{12} - Q'_{12} \cdot R_{12}}{U_2} = \\ &= \frac{80,47 \cdot 12,05 - 38,539 \cdot 3,304}{232,003} = 3,631 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Напряжение в точке 1:

$$\begin{aligned}U_1 &= \sqrt{(U_2 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2} = \\ &= \sqrt{(232,003 - 3,148)^2 + 3,631^2} = 228,884 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Продольная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 1:

$$\begin{aligned}\Delta U_{\tau 1} &= \frac{(P_{\text{прив1}} - \Delta P_{x1}) \cdot R_{\tau 1} + (Q_{\text{прив1}} - \Delta Q_{x1}) \cdot X_{\tau 1}}{U_1} = \\ &= \frac{(80,47 - 0,164) \cdot 1,999 + (40,329 - 1,008) \cdot 50,381}{228,884} = 9,356 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 1:

$$\begin{aligned}\delta U_{\tau 1} &= \frac{(P_{\text{прив1}} - \Delta P_{x1}) \cdot X_{\tau 1} - (Q_{\text{прив1}} - \Delta Q_{x1}) \cdot R_{\tau 1}}{U_1} = \\ &= \frac{(80,47 - 0,164) \cdot 50,381 - (40,329 - 1,008) \cdot 1,999}{228,884} = 17,333 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Значение напряжения на шинах низкого напряжения подстанции 1, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$U'_{1н} = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{т1})^2 + (\delta U_{т1})^2} = \\ = \sqrt{(228,884 - 9,356)^2 + (17,333)^2} = 220,211 \text{ кВ.}$$

Расчет автотрансформатора.

2 этап. Продольная составляющая падения напряжения в луче высокого напряжения:

$$\Delta U_{в0} = \frac{P'_{2в} \cdot R_{т2в} + Q'_{2в} \cdot X_{т2в}}{U_2} = \\ = \frac{136,073 \cdot 0,258 + 86,04 \cdot 29,624}{232,003} = 11,137 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче высокого напряжения:

$$\delta U_{в0} = \frac{P'_{2в} \cdot X_{т2в} - Q'_{2в} \cdot R_{т2в}}{U_2} = \\ = \frac{136,073 \cdot 29,624 - 86,04 \cdot 0,258}{232,003} = 17,279 \text{ кВ.}$$

Напряжения в средней точке автотрансформатора:

$$U_{20} = \sqrt{(U_2 - \Delta U_{в0})^2 + (\delta U_{в0})^2} = \\ = \sqrt{(232,003 - 11,137)^2 + (17,279)^2} = 221,541 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая падения напряжения в луче среднего напряжения:

$$\Delta U_{0с} = \frac{P'_{2с} \cdot R_{т2с} + Q'_{2с} \cdot X_{т2с}}{U_{20}} = \\ = \frac{70,892 \cdot 0,258 + 33,041 \cdot 0}{221,541} = 0,083 \text{ кВ.}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче среднего напряжения:

$$\begin{aligned}\delta U_{0c} &= \frac{P'_{2c} \cdot X_{r2c} - Q'_{2c} \cdot R_{r2c}}{U_{20}} = \\ &= \frac{70,892 \cdot 0 - 33,041 \cdot 0,258}{221,541} = -0,038 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Значение напряжения на шинах среднего напряжения, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$\begin{aligned}U'_{2c} &= \sqrt{(U_{20} - \Delta U_{0c})^2 + (\delta U_{0c})^2} = \\ &= \sqrt{(221,541 - 0,083)^2 + (-0,038)^2} = 221,458 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Продольная составляющая падения напряжения в луче низкого напряжения:

$$\begin{aligned}\Delta U_{0н} &= \frac{P'_{2н} \cdot R_{r2н} + Q'_{2н} \cdot X_{r2н}}{U_{20}} = \\ &= \frac{65,056 \cdot 0,516 + 38,55 \cdot 65,596}{221,541} = 11,56 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Поперечная составляющая падения напряжения в луче низкого напряжения:

$$\begin{aligned}\delta U_{0н} &= \frac{P'_{2н} \cdot X_{r2н} - Q'_{2н} \cdot R_{r2н}}{U_{20}} = \\ &= \frac{65,056 \cdot 65,596 - 38,55 \cdot 0,516}{221,541} = 19,172 \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Значение напряжения на шинах низкого напряжения, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$U'_{2н} = \sqrt{(U_{20} - \Delta U_{0н})^2 + (\delta U_{0н})^2} = \\ = \sqrt{(221,541 - 11,56)^2 + (19,172)^2} = 210,854 \text{ кВ.}$$

Для дальнейшего расчета режима сети среднего напряжения необходимо сначала определить напряжения на шинах СН (примем, что коэффициент трансформации равен номинальному:

$$U_{2с} = \frac{U'_{2с} \cdot U_{сн}}{U_{вн}} = \frac{221,458 \cdot 121}{230} = 116,506 \text{ кВ.}$$

Расчет сети 110 кВ.

2 этап. Продольная составляющая падения напряжения в сопротивлении линии 23:

$$\Delta U_{23} = \frac{P'_{23} \cdot R_{23} + Q'_{23} \cdot X_{23}}{U_{2с}} = \\ = \frac{50,859 \cdot 2,346 + 26,544 \cdot 4,779}{116,506} = 2,113 \text{ кВ.}$$

Напряжение в точке 3:

$$U_3 = U_{2с} - \Delta U_{23} = 116,506 - 2,113 = 114,393 \text{ кВ.}$$

Продольная составляющая падения напряжения в обмотках трансформаторов на подстанции 3:

$$\Delta U_{т3} = \frac{(P_{прив3} - \Delta P_{х3}) \cdot R_{т3} + (Q_{прив3} - \Delta Q_{х3}) \cdot X_{т3}}{U_3} = \\ = \frac{(50,246 - 0,072) \cdot 0,711 + (26,057 - 0,52) \cdot 17,358}{114,393} = 4,187 \text{ кВ.}$$

Значение напряжения на шинах низкого напряжения подстанции 3, приведенное к шинам высокого напряжения:

$$U'_{3н} = U_3 - \Delta U_{т3} = 114,393 - 4,187 = 110,206 \text{ кВ} .$$

6.7. Варианты исходных данных для самостоятельного решения задачи

В таблицах 6.7, 6.8, 6.9 приведены исходные данные для самостоятельного решения задачи.

Таблица 6.7

Исходные данные по ветвям схемы

№ варианта	Марка провода ЛЭП				Длина ЛЭП, км			
	A-1	A-2	1-2	2-3	A-1	A-2	1-2	2-3
1	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 70/11	80	70	40	30
2	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 95/16	85	65	45	40
3	АС 300/39	АС 300/39	АС 240/32	АС 95/16	75	55	35	25
4	АС 300/39	АС 300/39	АС 240/32	АС 150/24	50	70	40	45
5	АС 400/51	АС 400/51	АС 300/39	АС 240/32	60	55	45	50
6	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 95/16	80	100	50	40
7	АС 300/39	АС 240/32	АС 240/32	АС 120/19	75	60	40	50
8	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 120/19	80	80	55	30
9	АС 300/39	АС 400/51	АС 240/32	АС 185/29	80	100	60	50
10	АС 240/32	АС 300/39	АС 240/32	АС 240/32	65	90	45	40
11	АС 400/51	АС 300/39	АС 240/32	АС 70/11	100	100	60	50
12	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 95/16	90	110	55	35
13	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 120/19	130	140	70	40
14	АС 400/51	АС 400/51	АС 300/39	АС 150/24	70	70	40	50
15	АС 300/39	АС 400/51	АС 240/32	АС 240/32	55	75	40	35
16	АС 240/32	АС 400/51	АС 240/32	АС 95/16	60	70	50	60
17	АС 300/39	АС 400/51	АС 240/32	АС 95/16	60	80	40	30
18	АС 400/51	АС 400/51	АС 300/39	АС 95/16	80	80	40	20
19	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 185/29	100	100	60	55

Окончание табл. 6.7

№ варианта	Марка провода ЛЭП				Длина ЛЭП, км			
	А-1	А-2	1-2	2-3	А-1	А-2	1-2	2-3
20	АС 400/51	АС 400/51	АС 240/32	АС 240/32	90	90	70	45
21	АС 240/32	АС 300/39	АС 240/32	АС 70/11	30	50	40	35
22	АС 400/51	АС 400/51	АС 240/32	АС 70/11	75	80	50	45
23	АС 300/39	АС 400/51	АС 300/39	АС 95/16	55	75	40	35
24	АС 240/32	АС 240/32	АС 240/32	АС 150/24	100	110	70	40
25	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/39	АС 185/29	50	70	35	30
26	АС 400/51	АС 400/51	АС 240/32	АС 70/11	55	55	40	25
27	АС 300/39	АС 300/39	АС 240/32	АС 95/16	45	65	25	25
28	АС 300/39	АС 300/39	АС 240/32	АС 120/19	65	90	45	15
29	АС 300/39	АС 300/39	АС 240/32	АС 150/24	50	30	30	35
30	АС 300/39	АС 400/51	АС 240/32	АС 240/32	40	50	35	30

Таблица 6.8

Исходные данные по трансформаторам ПС

№ варианта	Тип трансформатора		
	ПС 1	ПС 2	ПС 3
1	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-10000/110
2	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-16000/110
3	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-25000/110
4	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-40000/110
5	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110
6	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-10000/110
7	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-16000/110
8	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-25000/110
9	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-40000/110
10	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110
11	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-10000/110
12	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТДН-16000/110
13	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-25000/110
14	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-40000/110
15	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110
16	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-10000/110
17	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-16000/110

Окончание табл. 6.8

№ варианта	Тип трансформатора		
	ПС 1	ПС 2	ПС 3
18	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-25000/110
19	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-40000/110
20	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110
21	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-10000/110
22	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-16000/110
23	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-25000/110
24	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-40000/110
25	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110
26	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-10000/110
27	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТДН-16000/110
28	ТРДН-40000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДН-25000/110
29	ТРДЦН-100000/220	АТДЦТН-63000/220/110	ТРДН-40000/110
30	ТРДЦН-63000/220	АТДЦТН-125000/220/110	ТРДЦН-63000/110

Таблица 6.9

**Исходные данные по нагрузкам ПС
и напряжению на шинах источника питания**

№ варианта	$P_{нб}$, МВт				$\cos\varphi_{нб}$				U_A , кВ
	1	2 (10 кВ)	2 (110 кВ)	3	1	2 (10 кВ)	2 (110 кВ)	3	
1	80	70	40	30	0,93	0,88	0,93	0,9	248
2	85	20	30	20	0,94	0,9	0,92	0,91	248
3	130	15	25	30	0,92	0,9	0,93	0,92	248
4	50	40	50	50	0,89	0,9	0,94	0,89	248
5	140	20	40	80	0,91	0,91	0,92	0,93	248
6	52	40	20	10	0,91	0,9	0,93	0,91	246
7	120	30	20	18	0,91	0,91	0,92	0,92	246
8	80	20	25	28	0,92	0,93	0,94	0,93	246
9	84	30	60	48	0,92	0,9	0,92	0,9	246
10	45	25	35	78	0,92	0,9	0,93	0,94	246
11	125	37	38	9	0,9	0,89	0,9	0,92	244

Окончание табл. 6.9

№ варианта	$P_{\text{нб}}, \text{МВт}$				$\cos\varphi_{\text{нб}}$				$U_A, \text{кВ}$
	1	2 (10 кВ)	2 (110 кВ)	3	1	2 (10 кВ)	2 (110 кВ)	3	
12	54	27	35	17	0,91	0,92	0,91	0,93	244
13	45	10	30	27	0,92	0,9	0,92	0,94	244
14	120	30	70	47	0,9	0,89	0,91	0,91	244
15	75	25	45	77	0,91	0,91	0,91	0,88	244
16	75	30	100	11	0,91	0,9	0,91	0,92	242
17	77	35	90	19	0,92	0,91	0,91	0,93	242
18	135	25	85	29	0,91	0,89	0,91	0,94	242
19	47	15	10	49	0,91	0,92	0,94	0,91	242
20	115	30	30	79	0,91	0,88	0,92	0,88	242
21	30	45	90	8	0,9	0,91	0,92	0,9	240
22	110	40	80	16	0,9	0,9	0,92	0,91	240
23	80	30	90	24	0,9	0,89	0,92	0,92	240
24	70	20	5	44	0,9	0,93	0,9	0,89	240
25	40	35	40	70	0,88	0,94	0,9	0,88	240
26	130	50	80	13	0,92	0,91	0,9	0,9	238
27	50	45	75	21	0,91	0,92	0,93	0,91	238
28	45	35	80	31	0,91	0,9	0,92	0,92	238
29	125	25	0	53	0,9	0,89	—	0,89	238
30	80	55	10	83	0,91	0,93	0,93	0,88	238

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

7.1. Задачи

1. Определить удельное (погонное) реактивное сопротивление воздушной линии, выполненной проводами со следующими параметрами: $R_0 = 0,277$ Ом/км, $d_{\text{пр}} = 10$ мм. Междупазное расстояние (расстояние между соседними фазами) составляет 4 м. Провода фаз расположены в горизонтальной плоскости.

2. Определить удельную (погонную) емкостную проводимость воздушной линии, выполненной проводами со следующими параметрами: $R_0 = 0,150$ Ом/км, $d_{\text{пр}} = 25$ мм. Междупазное расстояние (расстояние между соседними фазами) составляет $D_{AB} = 4$ м, $D_{BC} = 6$ м, $D_{AC} = 8$ м.

3. Определить эквивалентное активное сопротивление луча среднего напряжения схемы замещения двух параллельно установленных трансформаторов ТДТН-25000/110/35.

4. Определить активное сопротивление луча низшего напряжения схемы замещения автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110.

5. Определить значение реактивной составляющей нагрузки в узле при следующих значениях:

- номинальная мощность нагрузки (при номинальном напряжении 6 кВ) равна $20 + j10$ МВА;

- фактическое напряжение в узле нагрузки 6,9 кВ;

- нагрузка задана в виде статических характеристик нагрузок: $Q(U) = 0,6 \cdot U + 0,4$.

6. Определить реактивную составляющую потерь мощности в обмотках трансформатора ТРДН-40000/220, если нагрузка на шинах низшего напряжения $44 + j13$ МВА.

7. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.1): провод АС 400/51, длина линии 150 км; трансформатор ТРДЦН-63000/220.

Значение нагрузки на шинах низшего напряжения подстанции: 100 МВт при коэффициенте реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,5. Напряжение до идеального трансформатора (за сопротивлением обмоток трансформатора в схеме замещения) 202 кВ. Произвести расчет режима.

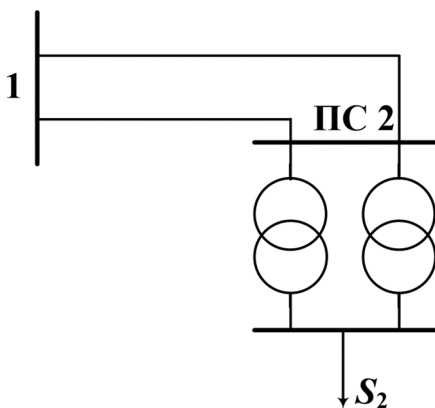


Рис. 7.1. Схема сети

8. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.1): провод АС 400/51, длина линии 100 км; трансформатор ТРДЦН-100000/220.

Мощность, выдаваемая в сеть с шин источника питания: 100 МВА при коэффициенте реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,75. Напряжение на шинах источника питания 232 кВ. Произвести расчет режима (включая напряжение до идеального трансформатора).

9. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.2): провод АС 240/32, длина линии 200 км; трансформатор ТРДН-40000/220.

Значение нагрузки на шинах низшего напряжения подстанции: 60 МВт при коэффициенте реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,45. Напряжение на шинах источника питания 222 кВ. Произвести расчет режима (включая напряжение до идеального трансформатора).

10. Параметры двухцепной электропередачи 110 кВ (рис. 7.2): провод АС 240/32, длина линии 50 км; трансформатор ТРДН-40000/110.

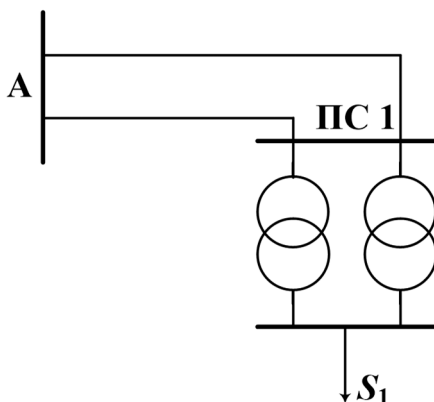


Рис. 7.2. Схема сети

Мощность, выдаваемая в сеть с шин источника питания: 60 МВт при коэффициенте мощности ($\cos\varphi$) 0,9. Напряжение до идеального трансформатора (за сопротивлением обмоток трансформатора в схеме замещения) 98 кВ. Произвести расчет режима.

11. Параметры двухцепной электропередачи 110 кВ (рис. 7.3): линия Л1 – провод АС 150/24, длина 30 км; линия Л2 – провод АС 120/19, длина 20 км. Мощность, выдаваемая в сеть с шин источника питания, $P_1 = 65$ МВт, $Q_1 = 25$ Мвар; значение нагрузки $P_{\text{прив}2} = 40$ МВт, $\cos\varphi_2 = 0,90$; напряжение $U_1 = 121$ кВ. Произвести расчет режима.

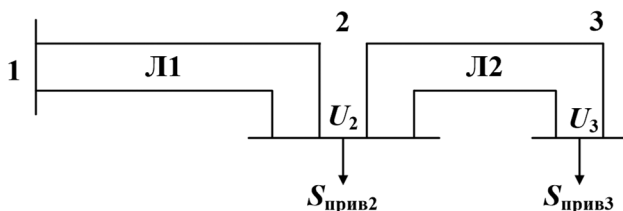


Рис. 7.3. Схема сети

12. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.3): линия Л1 – провод АС 300/39, длина 100 км; линия Л2 – провод АС 240/32, длина 100 км. Значение нагрузок $P_{\text{прив}2} = 50$ МВт, $\cos\varphi_2 = 0,93$, $P_{\text{прив}3} = 60$ МВт, $\cos\varphi_3 = 0,89$; напряжение $U_3 = 210$ кВ. Произвести расчет режима.

13. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.3): линия Л1 – провод АС 300/39, длина 80 км; линия Л2 – провод АС 240/32, длина 120 км. Мощность, выдаваемая в сеть с шин источника питания, $P_1 = 150$ МВт, $Q_1 = 75$ Мвар; значение нагрузки $P_{\text{прив}2} = 70$ МВт, $Q_{\text{прив}2} = 40$ Мвар; напряжение $U_3 = 212$ кВ. Произвести расчет режима.

14. Параметры двухцепной электропередачи 220 кВ (рис. 7.3): линия Л1 – провод АС 400/39, длина 100 км; линия Л2 – провод АС 240/32, длина 100 км. Мощность, выдаваемая с шин источника питания: $Q_1 = 40$ Мвар при $\cos\varphi_1 = 0,9$; приведенная нагрузка в узле 3 $Q_{\text{прив}3} = 20$ Мвар при $\cos\varphi_3 = 0,9$. Напряжение $U_1 = 240$ кВ. Произвести расчет режима.

15. На подстанции установлен трансформатор ТРДН-32000/220 (рис. 7.4). Значение нагрузки на шинах низшего напряжения $30 + j20$ МВА. Напряжение на шинах низшего напряжения подстанции составляет 10,2 кВ. Установлен номинальный коэффициент трансформации.

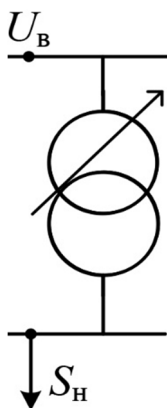


Рис. 7.4. Схема сети

Определить:

– какое напряжение должно быть на шинах высшего напряжения подстанции;

– приведенную к шинам высшего напряжения нагрузку подстанции.

16. На подстанции установлены два трансформатора ТРДН-40000/110 (рис. 7.5). Значение нагрузки на шинах низшего напряжения $40 + j30$ МВА. Напряжение на шинах низшего напряжения, приведенное к стороне высшего напряжения (до идеального трансформатора) 102 кВ. Рассчитать режим (найти напряжение на шинах ВН и приведенную нагрузку подстанции).

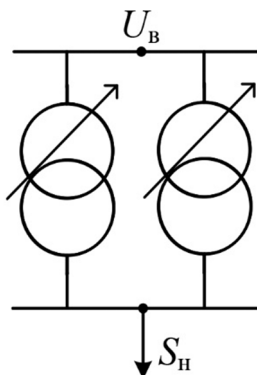


Рис. 7.5. Схема сети

17. Определить нагрузку, приведенную к шинам высшего напряжения подстанции (рис. 7.6), на которой установлен трансформатор ТДТН-25000/110/35.

Активная нагрузка на шинах низшего напряжения составляет 10 МВт, коэффициент реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,4.

Активная нагрузка на шинах среднего напряжения составляет 10 МВт, коэффициент реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,5.

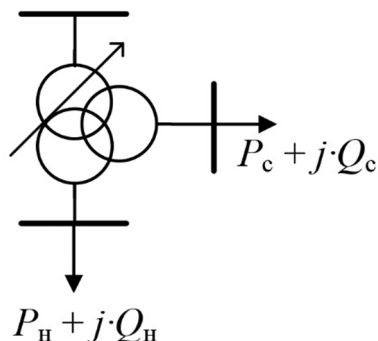


Рис. 7.6. Схема сети

18. На подстанции установлены два автотрансформатора АДЦТН-63000/220/110 (рис. 7.7). Активная нагрузка на шинах низшего напряжения составляет 20 МВт, коэффициент реактивной мощности ($\text{tg}\varphi$) 0,39. Активная нагрузка на шинах среднего напряжения составляет 50 МВт, коэффициент мощности ($\cos\varphi$) 0,88. Напряжение на шинах низшего напряжения автотрансформатора составляет 36,0 кВ.

Определить какое напряжение будет на шинах среднего напряжения подстанции, если установлен номинальный коэффициент мощности трансформатора.

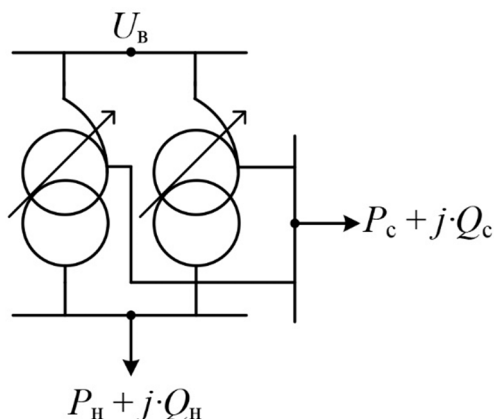


Рис. 7.7. Схема сети

19. На понижающей подстанции установлены два параллельно работающих автотрансформатора АТДЦТН-20000/220/110 (рис. 7.7). Нагрузка на входе в трансформатор на стороне высшего напряжения $P_{\text{в}} = 200$ МВт, $Q_{\text{с}} = 100$ Мвар, на шинах низшего напряжения: $P_{\text{н}} = 35$ МВт, $Q_{\text{н}} = 20$ Мвар; напряжение на шинах высшего напряжения подстанции $U_{\text{в}} = 222$ кВ. Рассчитать режим.

20. На понижающей подстанции установлены два параллельно работающих трансформатора ТДТН-63000/220/35 (рис. 7.8). Нагрузка в режиме наибольших нагрузок на стороне среднего и низшего напряжений соответственно: $P_{\text{с}} = 20$ МВт, $Q_{\text{с}} = 15$ Мвар, $P_{\text{н}} = 40$ МВт, $Q_{\text{н}} = 30$ Мвар; напряжение на шинах высшего напряжения подстанции $U_{\text{в}} = 218$ кВ. Рассчитать режим.

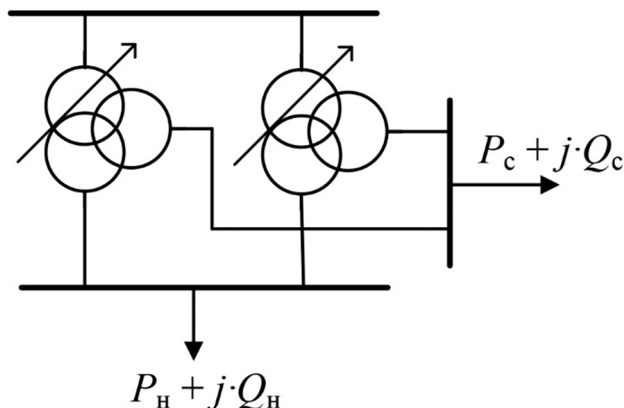


Рис. 7.8. Схема сети

21. По однородной кольцевой сети 110 кВ, выполненной проводами марки АС 95/16 получают питание две подстанции (рис. 7.9), их приведенные нагрузки $S_{\text{прив1}} = 20 + j6$ МВ·А, $S_{\text{прив2}} = 15 + j8$ МВ·А; длины линий: $L_{A1} = 30$ км, $L_{A2} = 20$ км, $L_{12} = 20$ км. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_A = 116$ кВ. Рассчитать режим кольцевой сети.

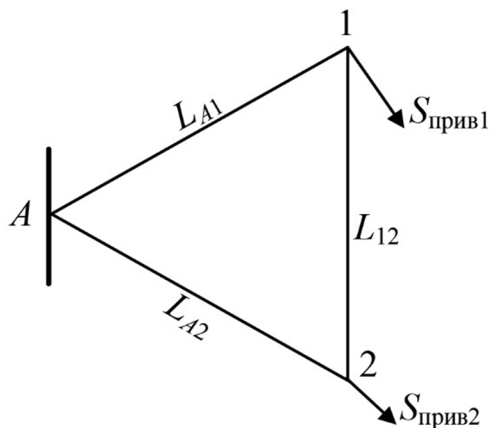


Рис. 7.9. Схема сети

22. Определите расчетную нагрузку узла 2 в самом тяжелом послеаварийном режиме в рассматриваемой однородной кольцевой сети напряжением 220 кВ (рис. 7.10), выполненной проводами марки АС 240/32.

Приведенные нагрузки подстанций $S_{прив1} = 110 + j40$ МВ·А, $S_{прив2} = 100 + j45$ МВ·А. Длины линий: $L_{01} = 80$ км, $L_{02} = 80$ км, $L_{12} = 40$ км. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_0 = 242$ кВ.

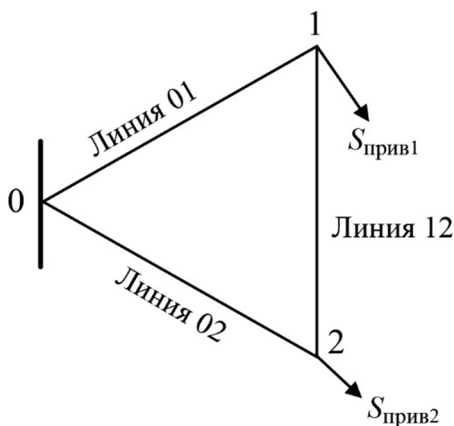


Рис. 7.10. Схема сети

23. Определите, в каком узле однородной кольцевой сети напряжением 110 кВ (рис. 7.11), выполненной проводами марки АС 150/24, точка потокораздела. Расчетные нагрузки подстанций $S_{p1} = 110 + j40$ МВ·А, $S_{p2} = 100 + j45$ МВ·А. Длины линий: $L_{01} = 80$ км, $L_{02} = 80$ км, $L_{12} = 40$ км. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_0 = 122$ кВ.

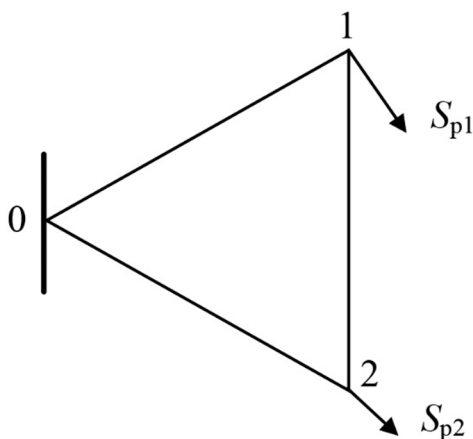


Рис. 7.11. Схема сети

24. Источником питания кольцевой сети 110 кВ (рис. 7.12) является подстанция ПС 1, на которой установлены два параллельно работающих автотрансформатора АТДЦТН-200000/220/110. Нагрузка на стороне низшего напряжения ПС 1: $S_{1н} = 120 + j65$ МВ·А. Кольцевая сеть выполнена проводами марки АС 240/32. Длины линий: $L_{12} = 20$ км, $L_{13} = 15$ км, $L_{23} = 20$ км. По кольцевой сети получают питание ПС 2 и ПС 3, приведенные нагрузки которых: $S_{прив2} = 40 + j20$ МВ·А, $S_{прив3} = 40 + j15$ МВ·А. Напряжение на шинах источника питания поддерживается равным $U_{1в} = 232$ кВ. Рассчитать режим сети. Принять коэффициент трансформации равным номинальному.

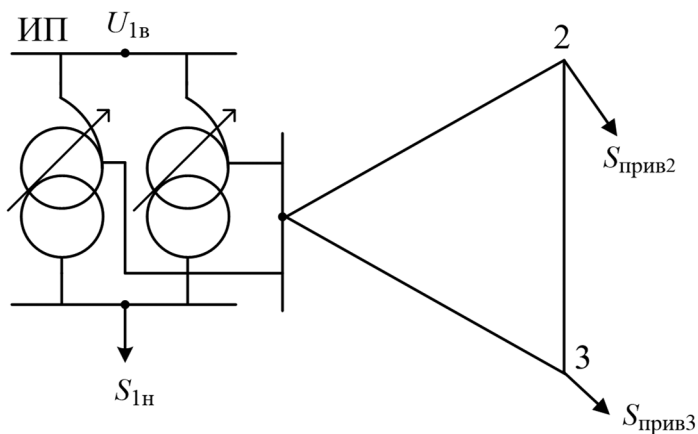


Рис. 7.12. Схема сети

25. Режим сети (рис. 7.3) был рассчитан методом систематизированного подбора. В результате получились графики, приведенные на рис. 7.13. Если напряжение на шинах источника питания 1 равно 220 кВ, то чему равно напряжение в узле 2?

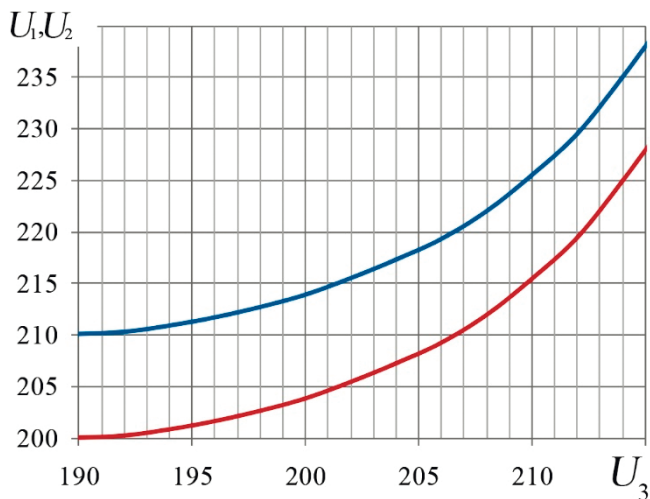


Рис. 7.13. Результаты расчета режима методом систематизированного подбора

26. Параметры двухцепной электропередачи 110 кВ (рис. 7.14): линия А-1 и 1-2 выполнены проводами АС 150/24, длина 30 км. Нагрузки заданы статическими характеристиками нагрузки $P_* = 0,9U_* + 0,1$, $Q_* = 0,9U_* + 0,1$. Значение нагрузок при номинальном напряжении $P_{\text{прив1}} = 40$ МВт, $Q_{\text{прив1}} = 15$ Мвар, $P_{\text{прив2}} = 40$ МВт, $Q_{\text{прив2}} = 15$ Мвар; напряжение на шинах ИП А $U_A = 120$ кВ. Произвести расчет режима.

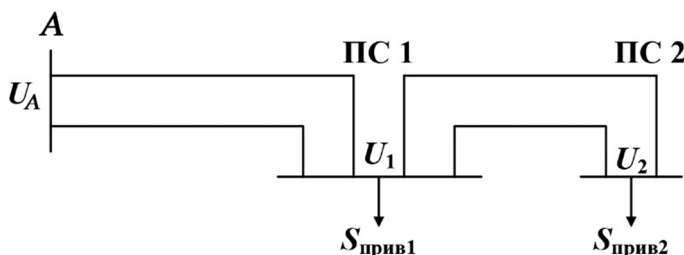


Рис. 7.14. Схема сети

27. По электропередаче 220 кВ (рис. 7.15) осуществляется выдача мощности электрической станции (ЭС) в приемную систему (ЭЭС). Эквивалентные параметры схемы замещения электропередачи: $R_{\text{л1}} = 5$ Ом, $X_{\text{л1}} = 20$ Ом, емкостной проводимостью пренебречь.

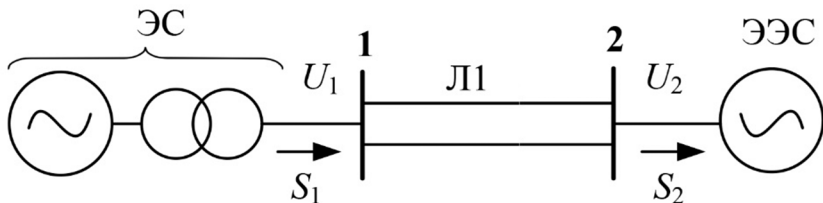


Рис. 7.15. Схема сети

В соответствии с диспетчерским графиком выдача с шин высшего напряжения ЭС активной мощности в электропередачу составляет $P_1 = 250$ МВт. Напряжение на шинах высшего напряжения ЭС поддерживается неизменным и равным $U_1 = 242$ кВ, напряжение на шинах ЭЭС составляет $U_2 = 230$ кВ.

Произвести расчет режима.

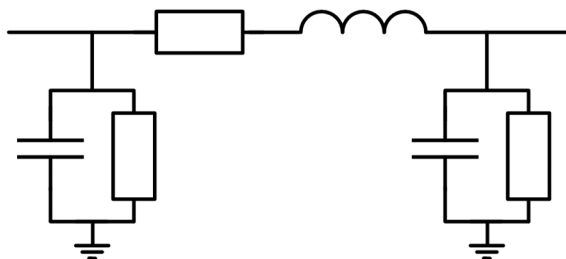
Что изменится в расчете, если емкостной проводимостью не пренебрегать?

7.2. Тесты

По главе 1

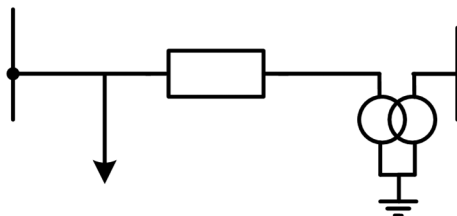
Необходимо в каждом задании выбрать один вариант правильного ответа.

1. На рисунке представлена схема замещения:



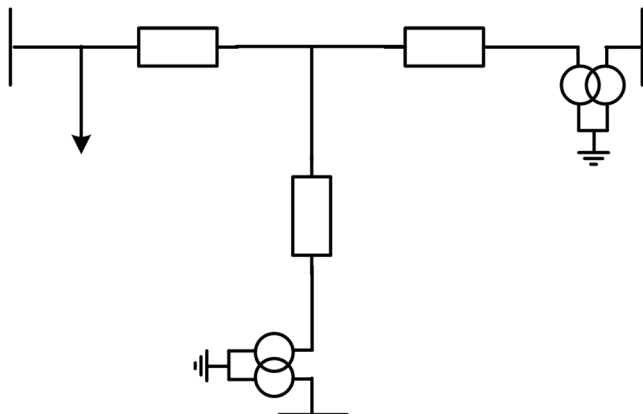
- линии электропередачи
- двухобмоточного трансформатора
- трехобмоточного трансформатора
- генератора
- нагрузки
- понижающей подстанции

2. На рисунке представлена схема замещения:



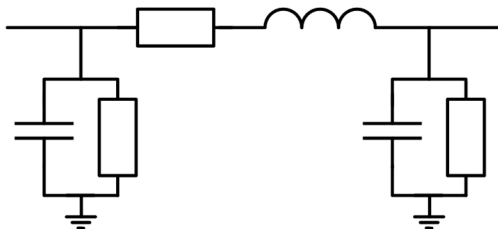
- линии электропередачи
- двухобмоточного трансформатора
- трехобмоточного трансформатора
- генератора
- нагрузки
- понижающей подстанции

3. На рисунке представлена схема замещения:



- линии электропередачи
- двухобмоточного трансформатора
- трехобмоточного трансформатора
- генератора
- нагрузки
- понижающей подстанции

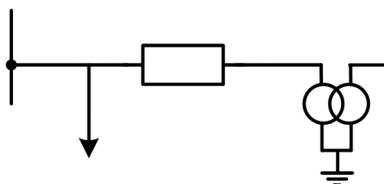
4. На рисунке представлена схема замещения:



- «П» - образная
- «Т» - образная
- «Г» - образная

- «С» - образная
- «Д» - образная

5. На рисунке представлена схема замещения:



- «П» - образная
- «Т» - образная
- «Г» - образная

- «С» - образная
- «Д» - образная

6. Для моделирования линий электропередачи используется схема замещения:

- «П» - образная
- «Т» - образная
- «Г» - образная

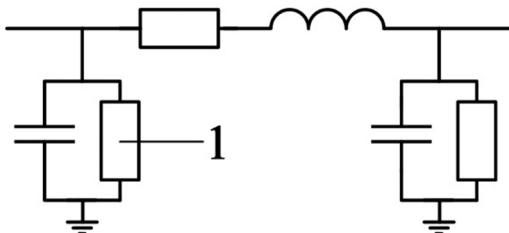
- «С» - образная
- «Д» - образная

7. Для моделирования трансформаторов используется схема замещения:

- «П» - образная
- «Т» - образная
- «Г» - образная

- «С» - образная
- «Д» - образная

8. Чем обусловлен параметр под номером 1 в схеме замещения:



- *удельным сопротивлением проводов фаз*
- *потерями мощности на нагрев проводов фаз*
- *емкостью между проводами фаз линии*
- *емкостью между проводами фаз и землёй*
- *потерями мощности на корону*

9. Активная проводимость линии электропередачи обусловлена:

- *удельным сопротивлением проводов фаз*
- *потерями мощности на нагрев проводов фаз*
- *емкостью между проводами фаз линии*
- *емкостью между проводами фаз и землёй*
- *потерями мощности на корону*

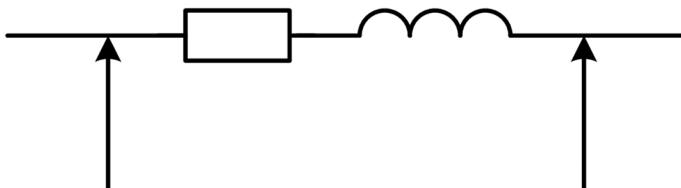
10. Индуктивное сопротивление линии электропередачи обусловлено:

- *самоиндукцией проводов фаз*
- *взаимоиндукцией между проводами фаз*
- *самоиндукцией проводов фаз и взаимоиנדукцией между проводами фаз*
- *нет верного ответа*

11. Емкостная проводимость линии электропередачи обусловлена:

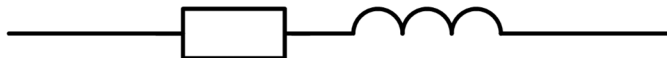
- наличием емкости между проводами фаз линии
- наличием емкости между проводами фаз и землёй
- наличием емкости между проводами фаз линии и между проводами фаз и землёй
- нет верного ответа

12. Приведенная схема замещения линии электропередачи применяется для моделирования:



- воздушной линии 500 кВ
- воздушной линии 220 кВ
- воздушной линии 35 кВ
- воздушной линии 380 В
- кабельной линии 220 кВ

13. Приведенная схема замещения линии электропередачи применяется для моделирования:



- воздушной линии 500 кВ
- воздушной линии 220 кВ
- воздушной линии 35 кВ
- воздушной линии 380 В
- кабельной линии 220 кВ

14. Приведенная схема замещения линии электропередачи применяется для моделирования:



- воздушной линии 500 кВ
- воздушной линии 220 кВ
- воздушной линии 35 кВ
- воздушной линии 380 В
- кабельной линии 220 кВ

15. До какого класса напряжения при расчетах параметров установившегося режима допускается не учитывать потери на корону:

- 110 кВ
- 500 кВ
- 330 кВ
- 220 кВ
- 35 кВ
- 10 кВ

16. Минимальное сечение проводов воздушных линий для каждого класса напряжения определяется ограничением:

- *потерь на корону*
- *по механическим свойствам проводов*
- *потерь холостого хода*
- *по температурным свойствам проводов*

17. Максимальное сечение проводов воздушных линий для каждого класса напряжения определяется ограничением:

- *потерь на корону*
- *по механическим свойствам проводов*
- *потерь холостого хода*
- *по температурным свойствам проводов*

18. Диапазон сечений проводов воздушных линий наиболее часто применяемых для класса напряжения 110 кВ:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| • 35–240 мм ² | • 240–500 мм ² |
| • 120–240 мм ² | • 70–240 мм ² |
| • 70–500 мм ² | • 35–150 мм ² |

19. Диапазон сечений проводов воздушных линий наиболее часто применяемых для класса напряжения 220 кВ:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| • 35–240 мм ² | • 240–500 мм ² |
| • 120–240 мм ² | • 70–240 мм ² |
| • 70–500 мм ² | • 35–150 мм ² |

20. Удельное активное сопротивление проводника:

- *прямо пропорционально поперечному сечению проводника*
- *обратно пропорционально поперечному сечению проводника*
- *не зависит от поперечного сечения проводника*
- *прямо пропорционально поперечному сечению проводника в квадрате*
- *обратно пропорционально поперечному сечению проводника в квадрате*

21. Расщепление проводов фазы приводит:

- *к увеличению потерь на корону*
- *увеличению активного сопротивления*
- *увеличению индуктивного сопротивления*
- *увеличению емкостной проводимости*
- *среди ответов нет верного*

22. Расщепление проводов фаз воздушных линий производят:

- для уменьшения активного сопротивления фаз
- выравнивания активного сопротивления фаз
- уменьшения реактивного сопротивления фаз
- выравнивания реактивного сопротивления фаз
- уменьшения потерь на корону
- выравнивания потерь на корону по фазам

23. Транспозицию проводов фаз воздушных линий производят:

- для уменьшения активного сопротивления фаз
- выравнивания активного сопротивления фаз
- уменьшения реактивного сопротивления фаз
- выравнивания реактивного сопротивления фаз
- уменьшения потерь на корону
- выравнивания потерь на корону по фазам

24. Расщепление проводов фаз воздушных линий начинают производить с номинального напряжения:

- | | | |
|----------|----------|-----------|
| • 35 кВ | • 220 кВ | • 750 кВ |
| • 110 кВ | • 330 кВ | • 1150 кВ |
| • 150 кВ | • 500 кВ | |

25. Расщепление проводов фаз ВЛ 500 кВ производят:

- | | |
|----------------|---------------|
| • на 2 провода | • 7 проводов |
| • 3–4 провода | • 9 проводов |
| • 4–5 проводов | • 12 проводов |

26. Расстояние между проводами расщепленной фазы равно:

- 4 мм
- 40 м
- 4 см
- *среднегеометрическому расстоянию между фазами*
- 40 см
- 4 м

27. Увеличение сечения провода воздушной линии в два раза повлияет на удельное активное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- не изменится (не повлияет)
- уменьшится в два раза
- увеличится не более чем на 10%
- увеличится в четыре раза
- уменьшится не более чем на 10%
- уменьшится в четыре раза

28. Увеличение диаметра провода воздушной линии в два раза повлияет на удельное активное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- уменьшится в четыре раза
- уменьшится в два раза
- не изменится (не повлияет)
- увеличится в четыре раза
- увеличится не более чем на 10%
- уменьшится в четыре раза
- уменьшиться не более чем на 10%

29. Увеличение сечения провода воздушной линии в два раза повлияет на удельное реактивное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- не изменится (не повлияет)
- уменьшится в два раза
- увеличится не более чем на 10%
- увеличится в четыре раза
- уменьшиться не более чем на 10%
- уменьшится в четыре раза

30. Увеличение диаметра провода воздушной линии в два раза повлияет на удельное реактивное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- уменьшится в два раза
- увеличится в четыре раза
- уменьшится в четыре раза
- не изменится (не повлияет)
- увеличится не более чем на 10%
- уменьшится не более чем на 10%

31. Увеличение номинального напряжения воздушной линии в два раза при той же самой марке провода повлияет на удельное активное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- уменьшится в два раза
- увеличится в четыре раза
- уменьшится в четыре раза
- не изменится (не повлияет)
- увеличится не более чем на 10%
- уменьшится не более чем на 10%

32. Увеличение номинального напряжения воздушной линии в два раза при той же самой марке провода повлияет на удельное реактивное сопротивление провода:

- увеличится в два раза
- уменьшится в два раза
- увеличится в четыре раза
- уменьшится в четыре раза
- не изменится (не повлияет)
- увеличится не более чем на 10%
- уменьшится не более чем на 10%

33. Увеличение номинального напряжения воздушной линии в два раза при той же самой марке провода повлияет на удельную зарядную мощность линии:

- увеличится в два раза
- уменьшится в два раза
- увеличится в четыре раза
- уменьшится в четыре раза
- не изменится (не повлияет)
- увеличится не более чем на 10%
- уменьшится не более чем на 10%

34. Активное сопротивление двухцепной линии длиной L с удельным активным сопротивлением R_0 вычисляется по формуле:

- | | |
|---------------------|--------------------|
| • $\frac{R_0 L}{2}$ | • $\frac{R_0}{2L}$ |
| • $R_0 L$ | • $\frac{4R_0}{L}$ |
| • $2R_0 L$ | • $\frac{R_0}{4L}$ |
| • $\frac{2R_0}{L}$ | |

35. Индуктивное сопротивление одноцепной линии длиной L с удельным индуктивным сопротивлением X_0 вычисляется по формуле:

- | | |
|---------------------|--------------------|
| • $\frac{X_0 L}{2}$ | • $\frac{4X_0}{L}$ |
| • $2X_0 L$ | • $\frac{X_0}{4L}$ |
| • $X_0 L$ | • $\frac{2X_0}{L}$ |
| • $\frac{X_0}{2L}$ | |

36. Емкостная проводимость двухцепной линии длиной L с удельной емкостной проводимостью B_0 вычисляется по формуле:

- | | |
|---------------------|--------------------|
| • $\frac{B_0 L}{2}$ | • $\frac{4B_0}{L}$ |
| • $2B_0 L$ | • $\frac{B_0}{4L}$ |
| • $B_0 L$ | • $\frac{B_0}{2L}$ |
| • $\frac{2B_0}{L}$ | |

37. Зарядная мощность двухцепной линии длиной L с удельной зарядной мощностью Q_{c0} вычисляется по формуле:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| • $\frac{Q_{c0}L}{2}$ | • $\frac{4Q_{c0}}{L}$ |
| • $2Q_{c0}L$ | • $\frac{Q_{c0}}{4L}$ |
| • $Q_{c0}L$ | • $\frac{Q_{c0}}{2L}$ |
| • $\frac{2Q_{c0}}{L}$ | |

38. Зарядная мощность двухцепной линии длиной L с удельной емкостной проводимостью B_0 вычисляется по формуле:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| • $\frac{2B_0}{L}$ | • $\frac{U_{\text{ном}}^2}{B_0} L$ |
| • $U_{\text{ном}}^2 B_0$ | • $\frac{U_{\text{ном}}^2}{4B_0 L}$ |
| • $2U_{\text{ном}}^2 B_0 L$ | • $\frac{1}{2B_0 L}$ |
| • $\frac{U_{\text{ном}}^2}{B_0 L}$ | |

39. Для линий 110 кВ усредненное среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линий составляет:

- | | |
|-------|--------|
| • 1 м | • 8 м |
| • 3 м | • 11 м |
| • 5 м | • 22 м |

40. Для линий 220 кВ усредненное среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линий составляет:

- 1 м
- 3 м
- 5 м
- 8 м
- 11 м
- 22 м

41. Удельное активное сопротивление проводов воздушных линий 110 кВ находится в диапазоне:

- 10–100 Ом/км
- 1–10 Ом/км
- 0,1–0,4 Ом/км
- 0,05–0,12 Ом/км
- 0,1–1 кОм/км
- 0,01–1 Ом/км

42. Усредненное удельное реактивное сопротивление воздушных линий 110 кВ составляет:

- 0,4 Ом/км
- 1 кОм/км
- 0,1 Ом/км
- 100 Ом/км
- 10 Ом/км
- 1 Ом/км

43. Усредненная удельная зарядная мощность воздушных линий 220 кВ составляет:

- 0,14 Мвар/км
- 0,036 Мвар/км
- 0,0036 Мвар/км
- 1 Мвар/км
- 10 Мвар/км

44. Среднегеометрическое расстояние между проводами фаз линий вычисляется по формуле:

- $D_{\text{сг}} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}$
- $D_{\text{сг}} = \sqrt[2]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}$
- $D_{\text{сг}} = \sqrt[2]{D_{AB} + D_{BC} + D_{AC}}$
- $D_{\text{сг}} = \frac{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}{3}$
- $D_{\text{сг}} = \frac{D_{AB} + D_{BC} + D_{AC}}{3}$
- $D_{\text{сг}} = \frac{\sqrt[2]{D_{AB}} + \sqrt[2]{D_{BC}} + \sqrt[2]{D_{AC}}}{3}$

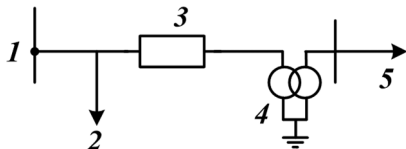
45. По формуле $\frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{пр}}}}$ вычисляется:

- удельное активное сопротивление линии
- удельная емкостная проводимость линии
- удельное индуктивное сопротивление линии
- удельная активная проводимость линии
- удельная индуктивная проводимость линии

46. По формуле $0,1445 \lg \frac{D_{\text{сг}}}{r_{\text{пр}}} + 0,0157$ вычисляется:

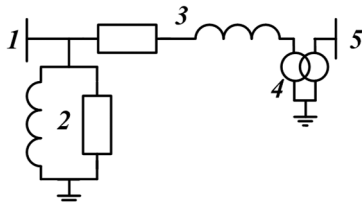
- удельное активное сопротивление линии
- удельная емкостная проводимость линии
- удельное индуктивное сопротивление линии
- удельная активная проводимость линии
- удельная индуктивная проводимость линии

47. Нагрузка на шинах низшего напряжения трансформатора обозначена цифрой:



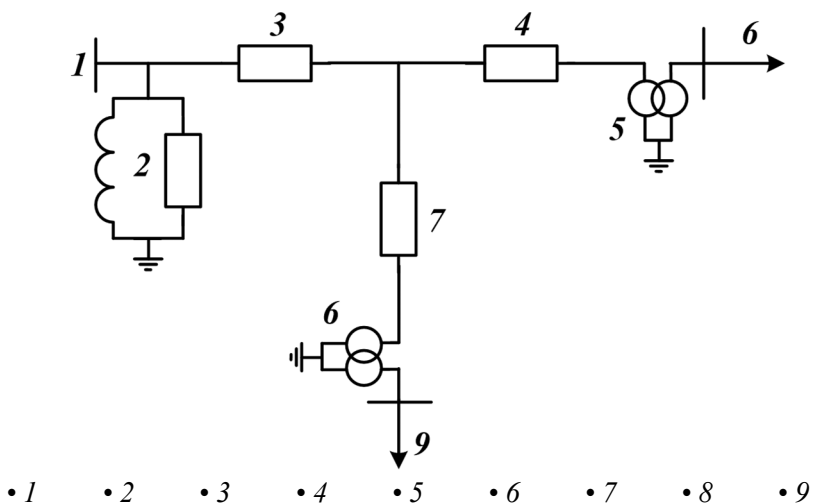
- 1 • 2 • 3 • 4 • 5

48. Потери холостого хода трансформатора отражены в элементе:



- 1 • 2 • 3 • 4 • 5

49. Потери холостого хода трансформатора отражены в элементе:



50. Активное сопротивление обмоток трансформатора определяется:

- *потерями холостого хода*
- *потерями короткого замыкания*
- *током холостого хода*
- *напряжением короткого замыкания*
- *среди ответов нет верного*

51. Реактивное сопротивление обмоток трансформатора определяется:

- *потерями холостого хода*
- *потерями короткого замыкания*
- *током холостого хода*
- *напряжением короткого замыкания*
- *среди ответов нет верного*

52. Коэффициент трансформации трансформатора определяется:

- потерями холостого хода
- потерями короткого замыкания
- током холостого хода
- напряжением короткого замыкания
- среди ответов нет верного

53. По формуле $\frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}^2}$ рассчитывается:

- активное сопротивление обмоток трансформатора
- индуктивное сопротивление обмоток трансформатора
- емкостное сопротивление обмоток трансформатора
- емкостная проводимость трансформатора
- активная проводимость трансформатора
- индуктивная проводимость трансформатора

54. По формуле $\frac{u_{\text{к}}}{100} \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}}$ рассчитывается:

- активное сопротивление обмоток трансформатора
- индуктивное сопротивление обмоток трансформатора
- емкостное сопротивление обмоток трансформатора
- емкостная проводимость трансформатора
- активная проводимость трансформатора
- индуктивная проводимость трансформатора

55. Активное сопротивление луча среднего напряжения схемы замещения трехобмоточного трансформатора определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 & \bullet \frac{0,5 \Delta P_{\text{кв-с}} U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}^2} & \bullet \frac{\Delta P_{\text{кв-с}} U_{\text{сн}}^2}{S_{\text{тном}}^2} \\
 & \bullet \frac{0,5 \Delta P_{\text{кв-с}} U_{\text{сн}}^2}{S_{\text{тном}}^2} & \bullet \frac{0,5 \Delta P_{\text{кс}} U_{\text{сн}}^2}{S_{\text{тном}}^2} \\
 & \bullet \frac{\Delta P_{\text{кс}} U_{\text{сн}}^2}{S_{\text{тном}}^2}
 \end{aligned}$$

56. Если номинальная мощность обмотки низшего напряжения составляет 50% номинальной мощности трехобмоточного трансформатора, то активные сопротивления лучей высшего, среднего и низшего напряжения соотносятся:

- $1:1:1$
- $1:5:5$
- $1:1:5$
- $5:1:1$
- $1:1:2$
- $0,5:1:1$

57. Если номинальная мощность обмотки низшего напряжения составляет 50% номинальной мощности трехобмоточного трансформатора, то реактивные сопротивления лучей высшего, среднего и низшего напряжения соотносятся:

- $1:1:1$
- $1:5:5$
- $1:1:5$
- $5:1:1$
- $1:1:2$
- $0,5:1:1$

58. Реактивное сопротивление луча низшего напряжения схемы замещения трехобмоточного трансформатора определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 & \bullet \frac{u_{\text{кн}}}{100} \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}} & \bullet \frac{(u_{\text{кв-н}} + u_{\text{кс-н}})}{100} \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тном}}} \\
 & \bullet \frac{u_{\text{кн}}}{100} \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тном}}} & \bullet \frac{u_{\text{кв-н}}}{100} \frac{U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{тном}}} \\
 & \bullet \frac{u_{\text{кв-н}}}{100} \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тном}}}
 \end{aligned}$$

59. Относительное значение напряжения короткого замыкания луча высшего напряжения схемы замещения автотрансформатора вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 & \bullet 0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}) & \bullet \frac{u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}}{3} \\
 & \bullet u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}} & \bullet \frac{u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}}{0,5} \\
 & \bullet 3(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}})
 \end{aligned}$$

60. Относительное значение напряжения короткого замыкания луча низшего напряжения схемы замещения автотрансформатора вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 & \bullet 0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}) & \bullet \frac{u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}}{3} \\
 & \bullet u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}} & \bullet \frac{u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}}{0,5} \\
 & \bullet 3(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}})
 \end{aligned}$$

61. По формуле $0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}})$ вычисляют напряжение короткого замыкания в схеме замещения трехобмоточного трансформатора:

- луча высшего напряжения
- луча среднего напряжения
- луча низшего напряжения
- суммарное всех трех обмоток
- обмоток высшего и низшего напряжений

62. Относительное значение напряжения короткого замыкания луча низшего напряжения схемы замещения трехобмоточного трансформатора вычисляется по формуле:

- $0,5(u_{\text{КВ-Н}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-С}})$
- $0,5(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}})$
- $0,5(u_{\text{КВ-С}} - u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}})$
- $0,5(u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}} + u_{\text{КВ-С}})$
- $0,5(u_{\text{КВ-С}} - u_{\text{КС-Н}} + u_{\text{КВ-Н}})$

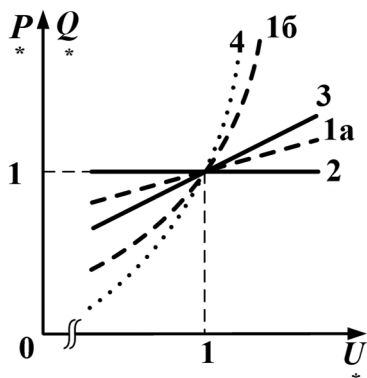
63. Реактивные потери холостого хода двух параллельно работающих автотрансформаторов вычисляются:

- $2 \frac{I_x}{100} S_{\text{ТНОМ}}$
- $\frac{I_x}{100} S_{\text{ТНОМ}}$
- $\frac{1}{2} \frac{I_x}{100} S_{\text{ТНОМ}}$
- $\frac{1}{2} 100 I_x S_{\text{ТНОМ}}$
- $\frac{1}{2} \frac{0,5 I_x}{100} S_{\text{ТНОМ}}$

64. Выберите корректный способ представления нагрузки в схемах замещения электрических сетей:

- $P_H, Q_H = \text{const}$
- $I_H = \text{const}$
- $R_H, X_H = \text{const}$
- *статические характеристики нагрузки*
- *все ответы верны*

65. Моделирование нагрузки неизменным током соответствует кривой:



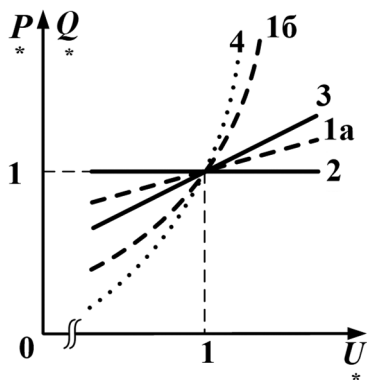
• 1б

• 2

• 3

• 4

66. Моделирование нагрузки неизменным сопротивлением соответствует кривой:



• 1а

• 2

• 3

• 4

67. Активная нагрузка моделируется неизменным током,

$$\text{если } P_{\text{ном}} \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right):$$

- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0$
- $\alpha_0 = 0; \alpha_1 = 1; \alpha_2 = 0$
- $\alpha_0 = 0; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1$
- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1$
- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 1; \alpha_2 = 1$

68. Активная нагрузка моделируется неизменным сопротивлением,

$$\text{если } P_{\text{ном}} \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right):$$

- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0$
- $\alpha_0 = 0; \alpha_1 = 1; \alpha_2 = 0$
- $\alpha_0 = 0; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1$
- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1$
- $\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 1; \alpha_2 = 1$

69. Статическая характеристика нагрузки задана верно,

$$\text{если } P_{\text{ном}} \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right):$$

- $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 0$
- $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 1$
- $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 > 0$
- $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 < 0$
- $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2$
- $\alpha_0 > \alpha_1 > \alpha_2$

70. Мощность нагрузки при ее задании неизменным током зависит от напряжения:

- *линейно*
- *экспоненциально*
- *квадратично*
- *логарифмически*
- *не зависит*

71. Мощность нагрузки при ее задании неизменной мощностью зависит от напряжения:

- *линейно*
- *экспоненциально*
- *квадратично*
- *логарифмически*
- *не зависит*

72. Самый точный способ представления нагрузки в схемах замещения сети:

- *неизменной мощностью*
- *неизменным током*
- *неизменным сопротивлением*
- *неизменным напряжением*
- *статическими характеристиками нагрузки*

73. Самый простой способ представления нагрузки в схемах замещения сети:

- *неизменной мощностью*
- *неизменным током*
- *неизменным сопротивлением*
- *неизменным напряжением*
- *статическими характеристиками нагрузки*

74. Способ представления нагрузки, применяемый при физическом моделировании сетей:

- неизменной мощностью
- неизменным током
- неизменным сопротивлением
- неизменным напряжением
- статическими характеристиками нагрузки

По главе 2

1. При заданном векторе напряжения, приложенном к активному сопротивлению, вектор тока относительно заданного напряжения будет:

- сонаправлен
- опережать на 90°
- отставать на 90°
- противоположно направлен

2. При заданном векторе напряжения, приложенном к чисто индуктивному сопротивлению, вектор тока относительно заданного напряжения будет:

- сонаправлен
- опережать на 90°
- отставать на 90°
- противоположно направлен

3. При заданном векторе напряжения, приложенном к чисто емкостному сопротивлению, вектор тока относительно заданного напряжения будет:

- сонаправлен
- опережать на 90°
- отставать на 90°
- противоположно направлен

4. При заданном векторе тока, через активное сопротивление, вектор напряжения относительно заданного тока будет:

- сонаправлен
- опережать на 90°
- отставать на 90°
- противоположно направлен

5. При заданном векторе тока, через чисто индуктивное сопротивление, вектор напряжения относительно заданного тока будет:

- *сонаправлен*
- *опережать на 90°*
- *отставать на 90°*
- *противоположно направлен*

6. При заданном векторе тока, через чисто емкостное сопротивление, вектор напряжения относительно заданного тока будет:

- *сонаправлен*
- *опережать на 90°*
- *отставать на 90°*
- *противоположно направлен*

7. При заданном векторе напряжения, приложенном к активно-индуктивному сопротивлению, вектор тока относительно заданного напряжения будет:

- *сонаправлен*
- *опережать на 90°*
- *отставать на 90°*
- *противоположно направлен*

8. При заданном векторе напряжения, приложенном к активно-емкостному сопротивлению, вектор тока относительно заданного напряжения будет:

- *сонаправлен*
- *опережать в диапазоне от 0 до 90°*
- *отставать в диапазоне от 0 до 90°*
- *противоположно направлен*

9. При заданном векторе тока через активно-индуктивное сопротивление, вектор напряжения относительно заданного тока будет:

- *сонаправлен*
- *опережать в диапазоне от 0 до 90°*
- *отставать в диапазоне от 0 до 90°*
- *противоположно направлен*

10. При заданном векторе тока через активно-емкостное сопротивление, вектор напряжения относительно заданного тока будет:

- *сонаправлен*
- *опережать в диапазоне от 0 до 90°*
- *отставать в диапазоне от 0 до 90°*
- *противоположно направлен*

11. При передаче активной мощности от начала воздушной линии к ее концу, вектор напряжения начала линии:

- *опережает вектор напряжения конца линии*
- *отстает от вектора напряжения конца линии*
- *противоположно направлен вектору напряжения конца линии*
- *сонаправлен с вектором напряжения конца линии*

12. Если угол напряжения начала линии 220 кВ больше угла напряжения конца этой линии, то активная мощность:

- *передается от начала к концу этой линии*
- *передается от конца к началу этой линии*
- *не передается по линии*
- *передается от меньшего угла к большему*

13. Потеря напряжения – это:

- *модуль от геометрической разности между векторами напряжений*
- *алгебраическая разность модулей напряжений*
- *разность между проекциями векторов напряжений на ось исходного напряжения*
- *геометрическая разность между векторами напряжений*

14. Падение напряжения – это:

- *модуль от геометрической разности между векторами напряжений*
- *алгебраическая разность модулей напряжений*
- *разность между проекциями векторов напряжений на ось исходного напряжения*
- *геометрическая разность между векторами напряжений*

15. Назовите допущения, применяемые при расчете сетей 110 кВ (в данном вопросе надо выбрать все правильные варианты ответов):

- *напряжения в узлах сети принимаются равными номинальному значению*
- *производится расчет комплексных значений напряжений в узлах сети*
- *при расчете напряжений в узлах сети не рассчитывается поперечная составляющая вектора падения напряжения*
- *при расчете напряжений в узлах сети не рассчитывается продольная составляющая вектора падения напряжения*
- *производится расчет модулей напряжения в узлах сети*

16. В сетях какого класса напряжения наблюдается наибольшая поперечная составляющая падения напряжения:

- *150 кВ*
- *35 кВ*
- *220 кВ*
- *110 кВ*

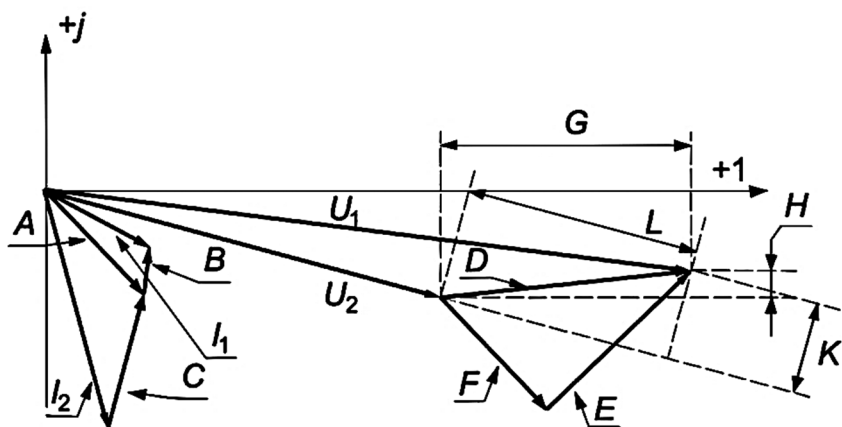
17. При практических расчетах для линий 220 кВ характерно следующее соотношение:

- *падение напряжения больше потерь напряжения*
- *падение напряжения меньше потерь напряжения*
- *падение напряжения численно равно потерям напряжения*
- *потери напряжения численно равны продольной составляющей падения напряжения*

18. Если вектор тока на продольном сопротивлении для П-образной схемы замещения воздушной линии электропередачи совпадает с вектором тока половины емкостной проводимости конца этой линии, то:

- линия работает в режиме холостого хода
- линия работает в режиме чисто активной нагрузки
- линия работает в режиме активно-индуктивной нагрузки
- такой режим невозможен

19. На рисунке изображена векторная диаграмма токов и напряжений по П-образной схеме замещения линии электропередачи 110 кВ. Значения токов (I) и напряжений (U) начала и конца линии обозначены, соответственно, индексами «1» и «2». Векторная диаграмма построена по данным конца линии.



— продольная составляющая вектора падения напряжения обозначена как:

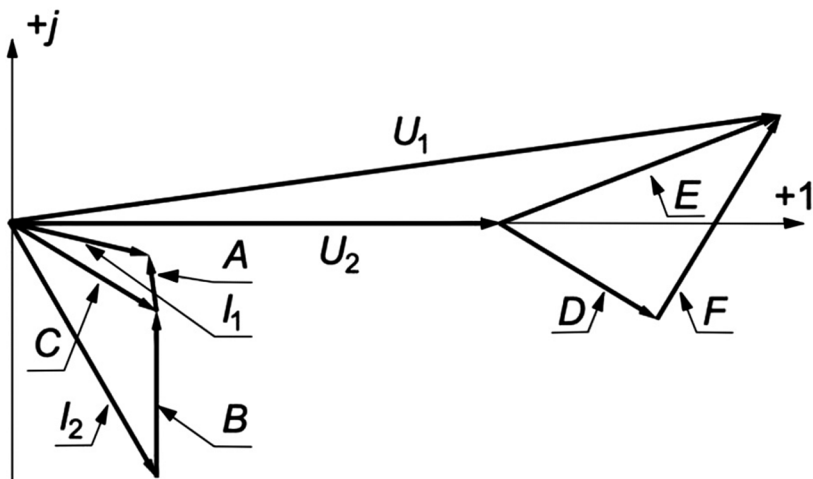
- | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| • A | • C | • E | • G | • L |
| • B | • D | • F | • K | • H |

– поперечная составляющая вектора падения напряжения обозначена как:

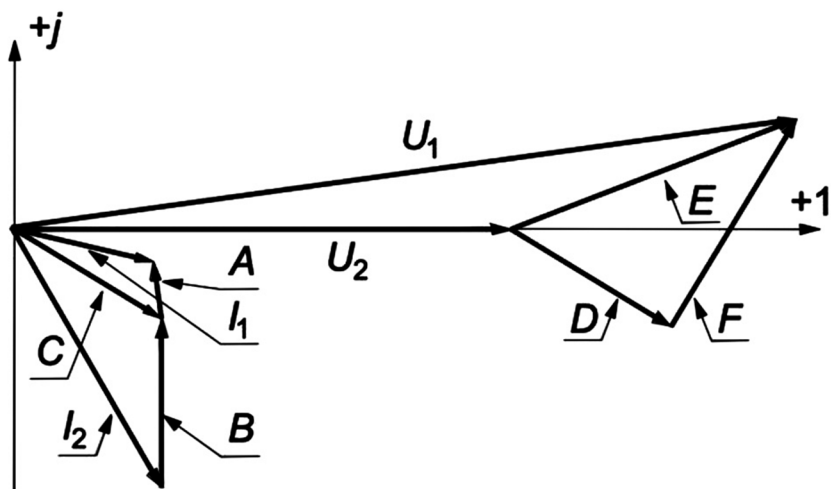
- A • C • E • G • L
- B • D • F • K • H

20. На рисунке изображена векторная диаграмма токов и напряжений по П-образной схеме замещения линии электропередачи 110 кВ (ЛЭП). Значения токов (I) и напряжений (U) начала и конца линии электропередачи обозначены, соответственно, индексами «1» и «2». Поставьте величины в соответствие обозначениям на векторной диаграмме:

вектор падения напряжения на продольном сопротивлении	A
вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении	B
вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении	C
вектор тока через емкость конца линии	D
вектор тока через емкость начала линии	E
вектор тока в продольном сопротивлении	F
потеря напряжения	



21. На рисунке изображена векторная диаграмма токов и напряжений по П-образной схеме замещения линии электропередачи 110 кВ (ЛЭП). Значения токов (I) и напряжений (U) начала и конца линии электропередачи обозначены, соответственно, индексами «1» и «2»:



– тогда под "F" обозначен(-а):

- вектор падения напряжения
- вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии
- вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии
- потеря напряжения
- продольная составляющая вектора падения напряжения
- поперечная составляющая вектора падения напряжения

– под "D" обозначен(-а):

- вектор падения напряжения
- вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии

- вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии
- потеря напряжения
- продольная составляющая вектора падения напряжения
- поперечная составляющая вектора падения напряжения

– под "E" обозначен(-а):

- вектор падения напряжения
- вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии
- вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии
- потеря напряжения
- продольная составляющая вектора падения напряжения
- поперечная составляющая вектора падения напряжения

– под "A" обозначен(-а):

- ток в емкости конца линии
- ток в емкости начала линии
- ток в продольном сопротивлении линии
- ток короны линии
- реактивная составляющая тока нагрузки
- ток холостого хода

– под "B" обозначен(-а):

- ток в емкости конца линии
- ток в емкости начала линии
- ток в продольном сопротивлении линии
- ток короны линии
- реактивная составляющая тока нагрузки
- ток холостого хода

– под " C " обозначен(-а):

- ток в емкости конца линии
- ток в емкости начала линии
- ток в продольном сопротивлении линии
- ток короны линии
- реактивная составляющая тока нагрузки
- ток холостого хода

– ориентация вектора " A " свидетельствует об его:

- активном характере
- индуктивном характере
- емкостном характере
- активно-индуктивном характере
- активно-емкостном характере

– ориентация вектора " B " определяется:

- вектором U_2
- вектором U_1
- вектором I_1
- вектором I_2

– увеличение тока в емкостной проводимости линии:

- приведет к уменьшению вектора I_1
- приведет к увеличению вектора I_1
- не приведет к изменению вектора I_1
- может привести как к снижению, так и к увеличению вектора I_1

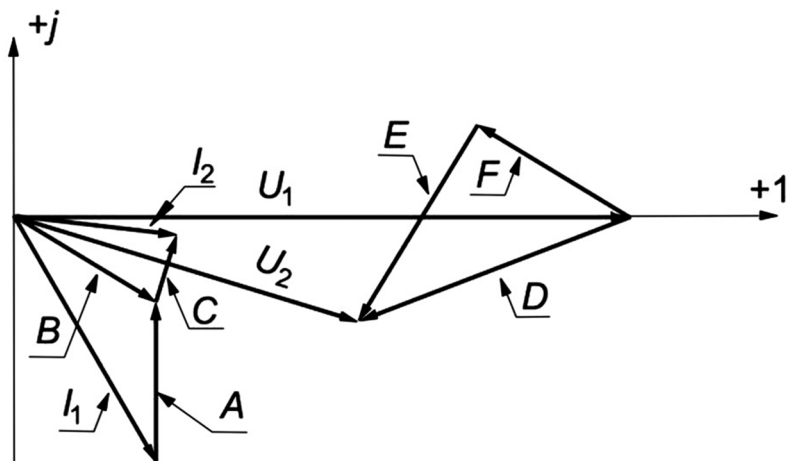
– вектор " F ":

- пропорционален активному продольному сопротивлению
- пропорционален реактивному продольному сопротивлению
- пропорционален емкостной проводимости
- пропорционален активной проводимости ЛЭП
- пропорционален суммарному активному и реактивному продольному сопротивлению

– вектор " D ":

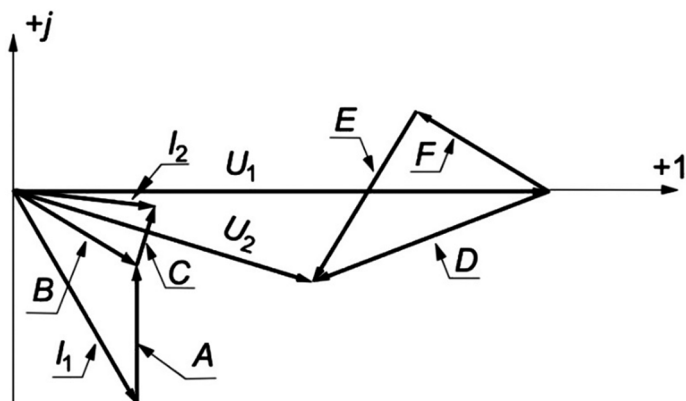
- пропорционален активному продольному сопротивлению
- пропорционален реактивному продольному сопротивлению
- пропорционален емкостной проводимости
- пропорционален активной проводимости ЛЭП
- пропорционален суммарному активному и реактивному продольному сопротивлению

22. На рисунке изображена векторная диаграмма токов и напряжений по Π -образной схеме замещения линии электропередачи 110 кВ. Значения токов (I) и напряжений (U) начала и конца линии обозначены, соответственно, индексами «1» и «2». Поставьте величины в соответствие обозначениям на векторной диаграмме:



вектор падения напряжения на продольном сопротивлении	A
вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении	B
вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении	C
вектор тока через емкость конца линии	D
вектор тока через емкость начала линии	E
вектор тока в продольном сопротивлении	F
потеря напряжения	

23. На рисунке изображена векторная диаграмма токов и напряжений по П-образной схеме замещения линии электропередачи 110 кВ. Значения токов (I) и напряжений (U) начала и конца линии обозначены, соответственно, индексами «1» и «2».



– тогда под "F" обозначен(-а):

- вектор падения напряжения
- вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии
- вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии
- потеря напряжения
- продольная составляющая вектора падения напряжения
- поперечная составляющая вектора падения напряжения

– под "D" обозначен(-а):

- вектор падения напряжения
- вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии
- вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии
- потеря напряжения

- *продольная составляющая вектора падения напряжения*
- *поперечная составляющая вектора падения напряжения*

– под "E" обозначен(-а):

- *вектор падения напряжения*
- *вектор падения напряжения на продольном активном сопротивлении линии*
- *вектор падения напряжения на продольном индуктивном сопротивлении линии*
- *потеря напряжения*
- *продольная составляющая вектора падения напряжения*
- *поперечная составляющая вектора падения напряжения*

– под "A" обозначен(-а):

- *ток в емкости конца линии*
- *ток в емкости начала линии*
- *ток в продольном сопротивлении линии*
- *ток короны линии*
- *реактивная составляющая тока нагрузки*
- *ток холостого хода*

– под "B" обозначен(-а):

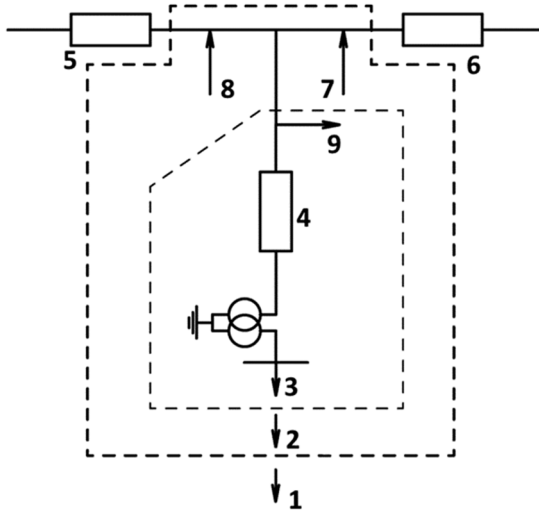
- *ток в емкости конца линии*
- *ток в емкости начала линии*
- *ток в продольном сопротивлении линии*
- *ток короны линии*
- *реактивная составляющая тока нагрузки*
- *ток холостого хода*

– под "C" обозначен(-а):

- *ток в емкости конца линии*
- *ток в емкости начала линии*
- *ток в продольном сопротивлении линии*
- *ток короны линии*
- *реактивная составляющая тока нагрузки*
- *ток холостого хода*

По главе 3

1. Приведен фрагмент сети.



– нагрузка на шинах НН подстанции обозначена цифрой:

• 1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7 • 8 • 9

– приведенная нагрузка подстанции обозначена цифрой:

• 1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7 • 8 • 9

– расчетная нагрузка подстанции обозначена цифрой:

• 1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7 • 8 • 9

– нагрузка, вычисляемая по формуле $P_H + jQ_H + \Delta P_T + j\Delta Q_T + \Delta P_x + j\Delta Q_x$, обозначена цифрой:

• 1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7 • 8 • 9

– нагрузка, вычисляемая по формуле $P_{\text{прив}} + jQ_{\text{прив}} - j\sum \frac{Q_{\text{сij}}}{2}$,

обозначена цифрой:

• 1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7 • 8 • 9

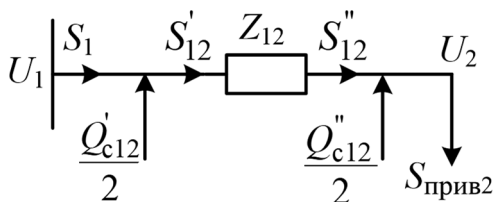
2. При расчете сетей 110–220 кВ методом «в 2 этапа» напряжения в узлах принимается равным:

- напряжению источника питания
- наибольшему рабочему напряжению сети
- номинальному напряжению сети
- среднему номинальному напряжению сети

3. Какой метод расчета необходимо применить для расчета сетей 110–220 кВ при известном напряжении источника питания и известных мощностях нагрузок:

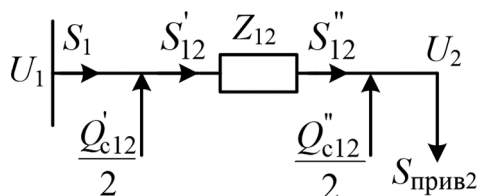
- метод «по данным конца»
- метод «по данным начала»
- метод в «2 этапа»
- метод систематизированного подбора

4. Для линии 220 кВ, схема замещения которой представлена на рисунке, напряжение в узле 1 при известном напряжении в узле 2 и падении напряжения на участке 1–2 определяется по формуле:



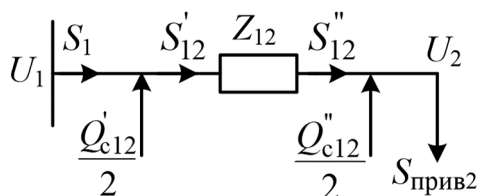
- $U_1 = \sqrt{(U_2 - \Delta U_{12})^2 - (\delta U_{12})^2}$
- $U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 - (\delta U_{12})^2}$
- $U_1 = \sqrt{(U_2 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}$
- $U_1 = U_2 + \Delta U_{12}$
- $U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}$

5. Для линии 110 кВ, схема замещения которой представлена на рисунке, напряжение в узле 2 при известном напряжении в узле 1 и падении напряжения на участке 1–2 определяется по формуле:



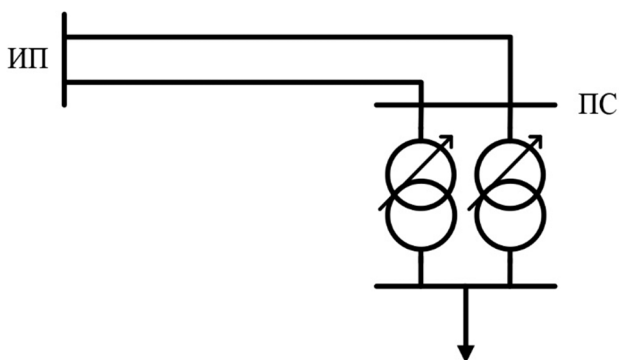
- $U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 - (\delta U_{12})^2}$
- $U_2 = \sqrt{(U_1 + \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}$
- $U_2 = U_1 - \Delta U_{12}$
- $U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + (\delta U_{12})^2}$
- $U_2 = \sqrt{(U_1 + \Delta U_{12})^2 - (\delta U_{12})^2}$

6. Для линии 220 кВ, схема замещения которой представлена на рисунке, поперечная составляющая вектора падения напряжения на участке 1–2 при расчете методом «по данным начала» определяется по формуле:



$$\begin{array}{lll}
 \bullet \frac{P'_{12}R_{12} + Q'_{12}X_{12}}{U_1} & \bullet \frac{P'_{12}R_{12} - Q'_{12}X_{12}}{U_1} & \bullet \frac{P''_{12}R_{12} - Q'_{12}X_{12}}{U_2} \\
 \bullet \frac{P'_{12}X_{12} - Q'_{12}R_{12}}{U_1} & \bullet \frac{P'_{12}R_{12} - Q'_{12}X_{12}}{U_2} & \bullet \frac{P'_{12}X_{12} + Q'_{12}R_{12}}{U_2} \\
 \bullet \frac{P'_{12}X_{12} + Q'_{12}R_{12}}{U_1} & \bullet \frac{P'_{12}X_{12} + Q'_{12}R_{12}}{U_2} &
 \end{array}$$

7. Дана схема сети:



– при отключении одного трансформатора потери мощности в сети:

- увеличатся
- уменьшатся
- не изменятся
- изменятся, могут как увеличиться так и уменьшиться

– при отключении одной цепи линии напряжение на шинах низшего напряжения подстанции:

- увеличится
- уменьшится
- не изменится
- изменится, может как увеличиться так и уменьшиться

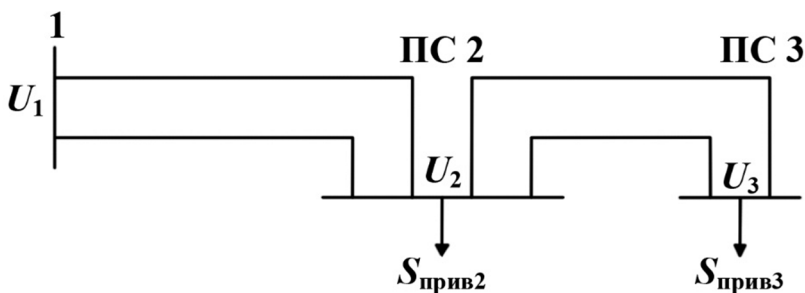
– при отключении одного трансформатора мощность, выдаваемая в сеть с шин источника питания в сеть:

- увеличится
- уменьшится
- не изменится
- изменится, может как увеличиться так и уменьшиться

– при отключении нагрузки на шинах низшего напряжения подстанции, напряжение на шинах низшего напряжения подстанции:

- увеличится
- уменьшится
- не изменится
- изменится, может как увеличиться так и уменьшиться

8. Дана схема сети:



– как будут соотноситься напряжения в узлах 1, 2, 3 при отключении нагрузки в узле 3 ($S_{прив3} = 0$). Сопротивления линий принять равными:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| • $U_1 > U_2 > U_3$ | • $U_2 > U_3 > U_1$ |
| • $U_3 > U_2 > U_1$ | • $U_1 > U_3 > U_2$ |
| • $U_2 > U_1 > U_3$ | • $U_3 > U_1 > U_2$ |

– как будут соотноситься напряжения в узлах 1, 2, 3 при отключении нагрузки в узле 2 ($S_{\text{прив}2} = 0$). Сопротивления линий принять равными:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| • $U_1 > U_2 > U_3$ | • $U_2 > U_3 > U_1$ |
| • $U_3 > U_2 > U_1$ | • $U_1 > U_3 > U_2$ |
| • $U_2 > U_1 > U_3$ | • $U_3 > U_1 > U_2$ |

– как будут соотноситься напряжения в узлах 1, 2, 3 при подключении в узле 2 генератора мощностью равной $S_{\text{прив}2}$. Сопротивления линий принять равными:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| • $U_1 > U_2 > U_3$ | • $U_2 > U_3 > U_1$ |
| • $U_3 > U_2 > U_1$ | • $U_1 > U_3 > U_2$ |
| • $U_2 > U_1 > U_3$ | • $U_3 > U_1 > U_2$ |

– как будут соотноситься напряжения в узлах 1, 2, 3 сети при подключении в узле 2 генератора мощностью $S_{\text{прив}2} + 1,5S_{\text{прив}3}$. Сопротивления линий принять равными:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| • $U_1 > U_2 > U_3$ | • $U_2 > U_3 > U_1$ |
| • $U_3 > U_2 > U_1$ | • $U_1 > U_3 > U_2$ |
| • $U_2 > U_1 > U_3$ | • $U_3 > U_1 > U_2$ |

По главе 4

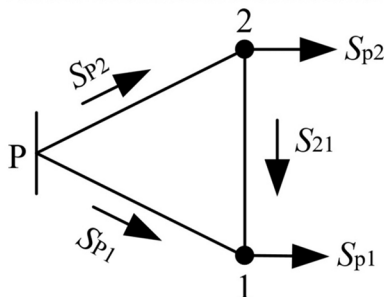
1. Допущениями при определении предварительного поточкораспределения в замкнутой сети являются (в данном вопросе надо выбрать все правильные варианты ответов):

- пренебрежение потерями мощности в сопротивлениях линий
- расчет проводится по длинам линий
- напряжение во всех узлах, кроме узла источника питания, принимается номинальным
- направление передачи активной и реактивной мощности совпадает

2. Точка потокораздела – это узел сети:

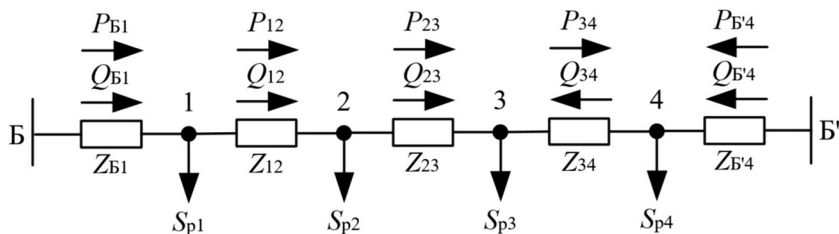
- к которому мощности или токи стекают со всех ветвей
- от которого мощности или токи оттекают по всем ветвям
- узел, в котором алгебраическая сумма токов или мощностей равна нулю
- узел, в котором геометрическая сумма токов или мощностей равна нулю

3. Выберите формулу для расчета предварительного значения мощности на участке P-1 для кольцевой неоднородной сети (L – длина линии, Z – комплексное сопротивление линии $\hat{Z}$ – комплексно-сопряженное сопротивление линии)



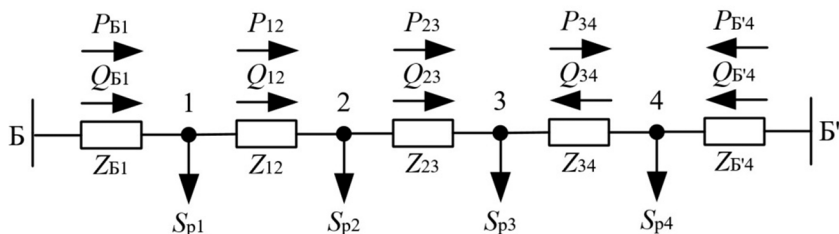
$$\begin{aligned}
 & \bullet \frac{S_{p1} \cdot \left(\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2} \right) + S_{p2} \cdot \left(\hat{Z}_{A2} \right)}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} & \bullet \frac{S_{p1} \cdot \left(Z_{A2} \right) + S_{p2} \cdot \left(Z_{A1} \right)}{Z_{A1} + Z_{12} + Z_{A2}} \\
 & \bullet \frac{S_{p1} \cdot \left(Z_{12} + Z_{A1} \right) + S_{p2} \cdot \left(Z_{A2} \right)}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}} & \bullet \frac{S_{p1} \cdot \left(Z_{A2} \right) - S_{p2} \cdot \left(Z_{A1} \right)}{Z_{A1} + Z_{12} + Z_{A2}} \\
 & \bullet \frac{S_{p1} \cdot \left(Z_{A1} \right) + S_{p2} \cdot \left(Z_{A2} + Z_{12} \right)}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{A2}}
 \end{aligned}$$

4. Определите точку потокораздела по активной мощности



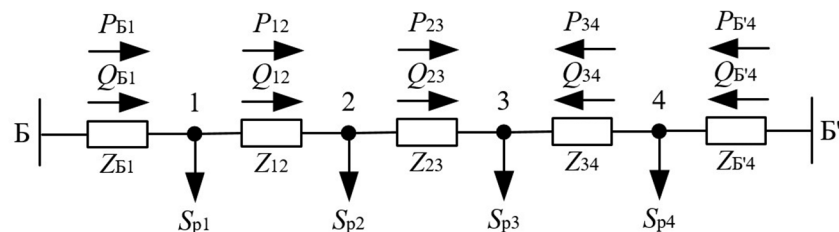
• B • 1 • 2 • 3 • 4

5. Определите точку потокораздела по реактивной мощности



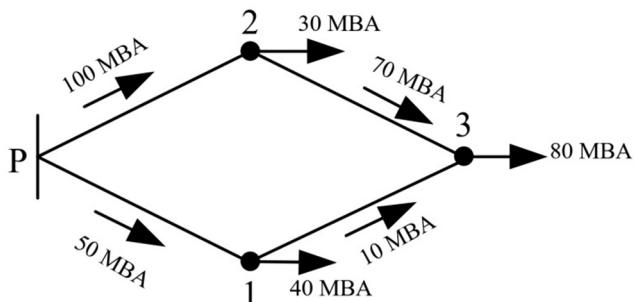
• B • 1 • 2 • 3 • 4

6. Определите точку потокораздела по активной мощности



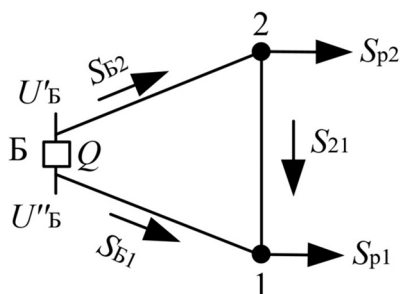
• B • 1 • 2 • 3 • 4

7. Наиболее тяжелым послеаварийным режимом для схемы, изображенной на рисунке, является:



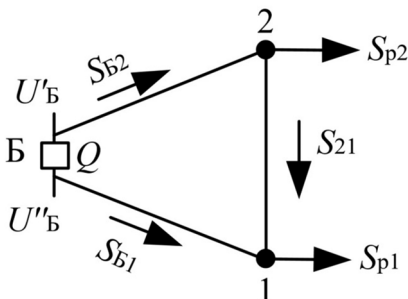
- отключение линии 2–3
- отключение линии P–1
- отключение линии P–2
- отключение линии 1–3
- выбор участка зависит от длин линий

8. В исходной схеме кольцевой сети, опирающейся на два независимых источника питания при отключенном выключателе Q $U'_Б > U''_Б$. Как изменится мощность на участке 2–1 после включения выключателя:



- увеличится
- уменьшится
- не изменится
- новое потокораспределение зависит от мощностей нагрузок

9. В исходной схеме кольцевой сети, опирающейся на два независимых источника питания при отключенном выключателе Q $U'_Б < U''_Б$. Как изменится мощность на участке Б–1 после включения выключателя:



- увеличится
- уменьшится
- не изменится
- новое потокораспределение зависит от мощностей нагрузок

По главе 5

1. Метод систематизированного подбора применяется в случае, когда нагрузка задана:

- мощностью
- сопротивлением
- током
- статическими характеристиками нагрузки

2. Напряжение на наиболее удаленной от источника питания нагрузке при расчете сети методом систематизированного подбора на первой итерации принимается равным:

- номинальному напряжению сети
- значению выше фактического напряжения источника питания
- фактическому напряжению в узле нагрузки
- значению ниже фактического напряжения источника питания

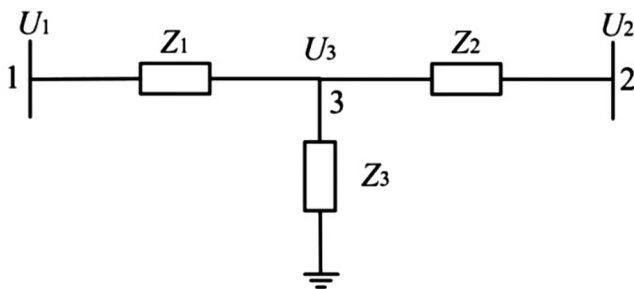
3. Собственная проводимость – это:

- *проводимость, определяющая напряжение в данном узле от действия ЭДС в данном узле при условии постоянства остальных ЭДС*
- *проводимость, определяющая ток в данной ветви от действия ЭДС в данной ветви при условии постоянства остальных ЭДС*
- *проводимость, определяющая напряжение в данном узле от действия ЭДС в данном узле при условии, что все остальные ЭДС равны нулю*
- *проводимость, определяющая ток в данной ветви от действия ЭДС в данной ветви при условии, что все остальные ЭДС равны нулю*

4. Взаимная проводимость – это:

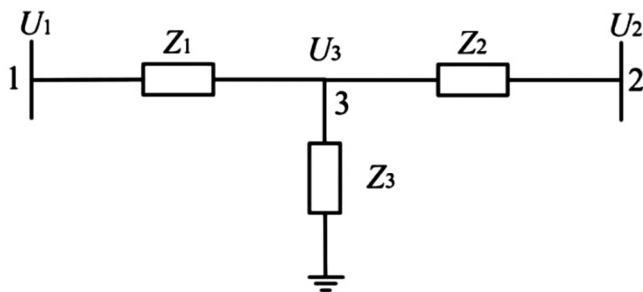
- *проводимость, определяющая напряжение в узле t от действия ЭДС в узле n при условии постоянства остальных ЭДС*
- *проводимость, определяющая ток в ветви t от действия ЭДС в ветви n при условии, что все остальные ЭДС равны нулю*
- *проводимость, определяющая ток в ветви t от действия ЭДС в ветви n при условии постоянства остальных ЭДС*
- *проводимость, определяющая напряжение в узле t от действия ЭДС в узле n при условии, что все остальные ЭДС равны нулю*

5. В каком отношении находятся взаимные проводимости Y_{12} и Y_{21} при равенстве всех сопротивлений (см. схему сети)



- $Y_{12} > Y_{21}$
- $Y_{12} < Y_{21}$
- $Y_{12} = Y_{21}$
- *недостаточно данных для определения отношения*

6. В каком отношении находятся собственная проводимость Y_{11} и взаимная проводимость Y_{12} при равенстве всех сопротивлений (см. схему сети)



- $Y_{12} > Y_{21}$
- $Y_{12} < Y_{21}$
- $Y_{12} = Y_{21}$
- *недостаточно данных для определения отношения*

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П1

Расчетные данные сталеалюминиевых проводов

Номинальное сечение (алюминий/сталь), мм ²	Диаметр провода, мм	r_0 , при 20°C, Ом/км
16/2,7	5,6	1,782
25/4,2	6,9	1,15
35/6,2	8,4	0,777
50/8	9,6	0,595
70/11	11,4	0,422
95/16	13,5	0,301
120/19	15,2	0,244
150/24	17,1	0,204
185/29	18,8	0,159
240/32	21,6	0,118
300/39	24	0,096
400/51	27,5	0,073
500/64	30,6	0,058

Таблица П2

Усредненные среднегеометрические расстояния между фазами воздушных линий

Номинальное напряжение, кВ	35	110	150	220	330	500
Среднегеометрическое расстояние, м	3,5	5	6,5	8	11	14

Расчетные данные
(активные и индуктивные сопротивления
и емкостные проводимости)
воздушных линий 10–220 кВ
со сталеалюминиевыми проводами

Номинальное сечение (алюминий/ сталь), мм ²	r_0 , при 20°С, Ом/км	10 кВ	35 кВ	110 кВ		150 кВ		220 кВ	
		x_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	$b_0, 10^{-6}$ См/км	x_0 , Ом/км	$b_0, 10^{-6}$ См/км	x_0 , Ом/км	$b_0, 10^{-6}$ См/км
16/2,7	1,782	0,405	—	—	—	—	—	—	—
25/4,2	1,15	0,401	—	—	—	—	—	—	—
35/6,2	0,777	0,386	0,451	—	—	—	—	—	—
50/8	0,595	0,378	0,442	—	—	—	—	—	—
70/11	0,422	0,367	0,432	0,444	2,55	0,460	2,46	—	—
95/16	0,301	0,356	0,421	0,434	2,61	0,450	2,52	—	—
120/19	0,244	0,347	0,414	0,427	2,66	0,441	2,56	—	—
150/24	0,204	—	0,406	0,42	2,70	0,434	2,61	—	—
185/29	0,159	—	0,4	0,413	2,75	0,429	2,64	—	—
240/32	0,118	—	—	0,405	2,81	0,420	2,70	0,435	2,60
300/39	0,096	—	—	—	—	—	—	0,429	2,64
400/51	0,073	—	—	—	—	—	—	0,420	2,70
500/64	0,058	—	—	—	—	—	—	0,413	2,74

Примечание. Удельные среднегодовые потери на корону для воздушных линий 220 кВ, выполненными проводами сечением 300/39 мм²: $\Delta P_{\text{уд.кор.300}} = 0,84 \text{ кВт/км}$, для воздушных линий 110 кВ, выполненными проводами сечением 120/19 мм²: $\Delta P_{\text{уд.кор.120}} = 0,083 \text{ кВт/км}$.

Расчетные данные
(активные и индуктивные сопротивления
и емкостные проводимости)
воздушных линий 330–500 кВ
со сталеалюминиевыми проводами

Номинальное сечение (алюминий/ сталь), мм ²	Число проводов в фазе, шт.	r_0 , при 20°С, Ом/км	330 кВ		500 кВ	
			x_0 , Ом/км	$b_0, 10^{-6}$ См/км	x_0 , Ом/км	$b_0, 10^{-6}$ См/км
240/32	2	0,0590	0,331	3,79	—	—
300/39	2	0,0480	0,328	3,41	—	—
300/66	3	0,330	—	—	0,31	3,97
330/43	3	0,0290	—	—	0,308	3,604
400/51	2	0,0365	0,323	3,46	—	—
	3	0,0243	—	—	0,306	3,623
500/64	2	0,0295	0,32	3,497	—	—
	3	0,0197	—	—	0,304	3,645

Примечание. Удельные среднегодовые потери на корону для воздушных линий 330 кВ, выполненными проводами сечением 400/51 мм²: $\Delta P_{\text{уд.кор.400}} = 2,9 \text{ кВт/км}$, для воздушных линий 500 кВ, выполненными проводами сечением 500/64 мм²: $\Delta P_{\text{уд.кор.500}} = 5,5 \text{ кВт/км}$.

Расчетные данные
(активные и индуктивные сопротивления)
кабельных линий 10–20 кВ

Сечение жилы, мм ²	Трехфазные кабели с бумажной пропитанной изоляцией			Однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена					
	r_0 , при 20°С, Ом/км		x_0 , Ом/км	r_0 , при 20°С, Ом/км		x_0 , Ом/км при прокладке			
	медь	алюминий		медь	алюминий	горизонтально		треугольником	
						10 кВ	20 кВ	10 кВ	20 кВ
50	0,370	0,620	0,090	0,387	0,641	0,184	0,217	0,127	0,141
70	0,260	0,443	0,086	0,268	0,443	0,177	0,210	0,119	0,133
95	0,194	0,326	0,083	0,193	0,320	0,170	0,202	0,112	0,125
120	0,153	0,258	0,081	0,153	0,253	0,166	0,199	0,108	0,123
150	0,122	0,206	0,079	0,124	0,206	0,164	0,193	0,106	0,116
185	0,099	0,167	0,077	0,0991	0,164	0,161	0,188	0,103	0,111
240	0,077	0,129	0,075	0,0754	0,125	0,157	0,183	0,099	0,106
300	—	—	—	0,0601	0,100	0,154	0,179	0,096	0,103
400	—	—	—	0,0470	0,0778	0,151	0,173	0,093	0,097
500	—	—	—	0,0366	0,0605	0,148	0,169	0,090	0,093

Таблица П6

Трехфазные двухобмоточные трансформаторы 6, 10, 20 кВ

Тип	$S_{т.ном},$ МВА	Каталожные данные						Расчетные данные		
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		$u_k,$ %	$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x, \%$	$R_T,$ Ом	$X_T,$ Ом	$\Delta Q_x,$ квар
		ВН	НН							
ТМ-25/10	0,025	6, 10, 20	0,4	4,7	0,69	0,13	3,20	110,4	188,0	0,80
ТМ-40/10	0,04			4,7	1,00	0,18	3,00	62,50	117,5	1,20
ТМ-63/10	0,063			4,7	1,47	0,24	2,80	37,04	74,60	1,76
ТМ-100/10	0,1			4,6	2,27	0,33	2,60	22,70	46,00	2,60
ТМ-160/10	0,16			4,7	3,10	0,51	2,40	12,11	29,38	3,84
ТМ-250/10	0,25			4,7	4,20	0,74	2,30	6,72	18,80	5,75
ТМ-400/10	0,4			4,5	5,90	0,95	2,10	3,69	11,25	8,40
ТМ-630/10	0,63			5,5	8,50	1,31	2,00	2,14	8,73	12,60
ТМ-1000/10	1			5,5	11,60	2,10	1,40	1,16	5,50	14,00
ТМ-1600/10	1,6			5,5	18,00	2,80	1,30	0,70	3,44	20,80
ТМ-2500/10	2,5			5,5	23,50	3,90	1,00	0,38	2,20	25,00
ТМ-4000/10	4			7,5	33,50	5,20	0,90	0,21	1,88	36,00
ТМ-6300/10	6,3			7,5	46,50	7,40	0,80	0,12	1,19	50,40

Примечание. Регулирование напряжения осуществляется на стороне ВН путем ПБВ $\pm 2 \times 2,5\%$.

Таблица П7

Трехфазные двухобмоточные трансформаторы 35 кВ

Тип	$S_{т.ном}$ МВА	Каталожные данные						Расчетные данные		
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		u_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %	R_t , Ом	X_t , Ом	ΔQ_x , квар
		ВН	НН							
ТМ-100/35	0,1	35	0,4	6,5	1,9	0,5	2,6	124,4	796,3	2,6
ТМ-160/35	0,16	35	0,4; 0,69	6,5	2,6	0,7	2,4	72,5	497,7	3,84
ТМ-250/35	0,25	35	0,4; 0,69	6,5	3,7	1	2,3	42,1	318,5	5,75
ТМН-400/35	0,4	35	0,4; 0,69	6,5	5,5	1,3	2,1	23,5	199,1	8,4
ТМН-630/35	0,63	35	0,4; 0,69; 6,3; 11	6,5	7,6	1,9	2	14,2	126,4	12,6
ТМН-1000/35	1	35	0,4; 0,69; 6,3; 11	6,5	11,6	2,7	1,5	7,9	79,63	15
ТМН-1600/35	1,6	35	6,3; 11	6,5	16,5	2,9	1,3	11,2	49,77	20,8
ТМН-2500/35	2,5	35	6,3; 11	6,5	23,5	3,9	1	4,6	31,85	25
ТМН-4000/35	4	35	6,3; 11	7,5	33,5	5,6	1,1	2,6	22,97	44
ТМН-6300/35	6,3	35	6,3; 11	7,5	46,5	8	0,8	1,4	14,58	50,4
ТДН-10000/35	10	36,75	6,3; 10,5	8,0	60	12,5	0,6	0,81	10,8	60
ТДН-16000/35	16	36,75	6,3; 10,5	10	85	17	0,7	0,45	8,441	112

Примечание. Трансформаторы ТМ имеют ПБВ на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5\%$; ТМН имеют РПН на стороне ВН $\pm 6 \times 1,5\%$; ТДН имеют РПН на стороне ВН $\pm 8 \times 1,5\%$.

Таблица П8

Трехфазные двухобмоточные трансформаторы 110 кВ

Тип	$S_{т.ном},$ МВА	Каталожные данные						Расчетные данные		
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		$u_k,$ %	$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x,$ %	$R_t,$ Ом	$X_t,$ Ом	$\Delta Q_x,$ квар
		ВН	НН							
ТМН-2500/110	2,5	110	6,6; 11	10,5	22	5,5	1,5	42,6	508,2	37,5
ТМН-6300/110	6,3	115	6,6; 11	10,5	44	10	1	14,661	220,42	63
ТДН-10000/110	10	115	6,6; 11	10,5	58	14	0,9	7,6705	138,86	90
ТДН-16000/110	16	115	6,6; 11; 34,5	10,5	85	18	0,7	4,3911	86,789	112
ТРДН-25000/110	25	115	6,3–6,3; 6,3–10,5; 10,5–10,5	10,5	120	25	0,65	2,5392	55,545	162,5
ТРДН-40000/110	40	115	6,3–6,3; 6,3–10,5; 10,5–10,5	10,5	170	34	0,55	1,4052	34,716	220
ТРДЦН- 63000/110	63	115	6,3–6,3; 6,3–10,5; 10,5–10,5	10,5	245	50	0,5	0,8164	22,042	315
ТРДЦН- 80000/110	80	115	6,3–6,3; 6,3–10,5; 10,5–10,5	10,5	310	58	0,45	0,6406	17,358	360
ТРДЦН- 125000/110	125	115	10,5–10,5	10,5	400	105	0,55	0,3386	11,109	687,5

Примечание. Все трансформаторы имеют РПН на стороне ВН $\pm 9 \times \times 1,78\%$, кроме трансформатора ТМН-2500/110, который имеет РПН на стороне ВН $+10 \times 1,5\%, -8 \times 1,5\%$.

Трехфазные двухобмоточные трансформаторы 220 кВ

Тип	$S_{т.ном},$ МВА	Каталожные данные						Расчетные данные		
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		$u_k,$ %	$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x,$ %	$R_t,$ Ом	$X_t,$ Ом	$\Delta Q_x,$ квар
		ВН	НН							
ТРДН-32000/220	32	230	6,6–6,6; 6,6–11; 11–11	11,5	150	45	0,65	7,749	190,11	208
ТРДН-40000/220	40	230	6,6–6,6; 11–11	11,5	170	50	0,6	5,6206	152,09	240
ТРДЦН-63000/220	63	230	6,6–6,6; 11–11	11,5	265	70	0,6	3,532	96,563	378
ТРДЦН-100000/220	100	230	11–11	12,5	340	102	0,65	1,7986	66,125	650
ТРДЦН-160000/220	160	230	11–11	12,5	500	155	0,6	1,0332	41,328	960

Примечание. Все трансформаторы имеют РПН на стороне ВН $\pm 8 \times 1,5\%$.

Таблица П110

Трехфазные трехобмоточные трансформаторы 110–220 кВ

Тип	S _{ном} , МВА	U _{ном} обмоток, кВ			u _к , %			ΔP _к , кВт (B-C)	ΔP _х , кВт	I _х , %	R _{бс} Ом	R _с , Ом	R _{бс} Ом	X _{бс} Ом	X _с , Ом	X _{бс} Ом	ΔQ _к , квар
		ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН										
ТМТН-6300/110/35	6,3	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	58	14	1,2	9,7	9,7	9,7	225,7	0	131,2	75,6
ТДТН-10000/110/35	10	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	76	17	1,1	5	5	5	142,2	0	82,7	110
ТДТН-16000/110/35	16	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	100	23	1	2,6	2,6	2,6	88,9	0	52	160
ТДТН-25000/110/35	25	115	38,5	6,6; 11	10,5	17,5	6,5	140	31	0,7	1,5	1,5	1,5	56,9	0	35,7	175
ТДТН-40000/110/35	40	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	200	43	0,6	0,8	0,8	0,8	35,5	0	22,3	240
ТДТН-63000/110/35	63	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6,5	290	56	0,7	0,5	0,5	0,5	22,0	0	13,6	441
ТДТН-80000/110/35	80	115	38,5	6,6; 11	11	18,5	7	390	82	0,6	0,4	0,4	0,4	18,6	0	11,9	480
ТДТН-25000/220/35	25	230	38,5	6,6; 11	12,5	20	6,5	135	50	1,2	5,7	5,7	5,7	275	0	148	300
ТДТН-40000/220/35	40	230	38,5	6,6; 11	12,5	22	9,5	220	55	1,1	3,6	3,6	3,6	165	0	125	440
АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	6,6; 11; 38,5	11	35,7	21,9	215	45	0,5	1,4	1,4	2,8	104	0	195,6	315
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,6; 11; 38,5	11	45	28	305	65	0,5	0,5	0,5	1,0	49	0	131	625
АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	6,6; 11; 38,5	11	32	20	430	125	0,5	0,3	0,3	0,6	30,4	0	54,2	1000
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	6,6; 11; 38,5	11,5	33,4	20,8	520	145	0,5	0,2	0,2	0,4	25,5	0	45,1	1250

Примечания.

1. Все трехобмоточные трансформаторы 110 и 220 кВ имеют РПН на стороне ВН $\pm 8 \times 1,5\%$ и ПБВ на стороне СН $\pm 2 \times 2,5\%$.
2. Для автотрансформаторов мощность обмотки НН равна 50% от номинальной.
3. Все автотрансформаторы 220 кВ имеют РПН на стороне СН $\pm 6 \times 2\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические системы. Электрические сети: учебник / под ред. В.А. Веникова и В.А.Строева. – М.: Высшая школа, 1998.
2. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989 (2009).
3. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети: учебник / А.В. Лыкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017.
4. Пospelов, Г.Е. Электрические системы и сети: учебник / Г.Е. Пospelов, В.Т. Федин, П.В. Лычев. – Минск: Технопринт, 2004.
5. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – М.: КноРус, 2016.
6. Блок, В.М. Электрические сети и системы: учеб. пособие / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986.
7. Боровиков, В.А. Электрические сети энергетических систем: учебник / В.А. Боровиков, В.К. Косарев, Г.А. Ходот. – Л.: Энергия, 1977.
8. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1981.
9. Глазунов, А.А. Электрические сети и системы: учебник / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. – М.: Госэнергоиздат, 1960.
10. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985.
11. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979.
12. Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник / Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

13. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: учеб. пособие / под ред. В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1999.
14. Лычев, П.В. Электрические системы и сети. Решение практических задач: учеб. пособие / П.В. Лычев, В.Т. Федин. – Минск: Дизайн ПРО, 1997.
15. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2005.
16. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / общ. ред. В.Г. Герасимова и др.; гл. ред. А.И. Попов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
17. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Учебное издание

Шведов Галактион Владимирович

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Том 1

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

Учебник

Редактор Е.Б. Бурдюкова
Компьютерная верстка А.В. Худяковой

Подписано в печать	10.04.25.	Печать офсетная	Формат 60х90 1/16
Печ. л. 16,25	Тираж 120 экз.	Изд. № 25уК-009	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.