

**МОИ**

---



---

***КНИГА-ПОБЕДИТЕЛЬ***  
**конкурса рукописей**  
**учебной, научно-технической**  
**и справочной литературы по энергетике,**  
**посвященного 90-летию МЭИ**  
**и 100-летию плана ГОЭЛРО**

Книга издана  
при поддержке  
ООО «Газпром энергохолдинг»

---



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

# МЕТРОЛОГИЯ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования по укрупненным группам  
специальностей и направлений подготовки  
13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика» в качестве учебного издания  
для реализации основных образовательных программ  
высшего образования по направлению подготовки  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Москва  
Издательство МЭИ  
2021

УДК 621.1  
ББК 31.3  
М 54

Подготовлено на кафедре автоматизированных систем управления  
тепловыми процессами

Рецензенты: **Николаева Н.В.**, канд. техн. наук, первый проректор  
ФГАОУ ДПО «ИПК ТЭК»;  
**Репин А.И.**, канд. техн. наук, руководитель отдела  
программного обеспечения ООО «Энергоавтоматика»

**Авторы:** Н.С. Долбикова, Л.М. Захарова, А.В. Кузнецова,  
Е.И. Мерзлякина, И.С. Никитина, А.В. Цыпин

М 54 Метрология и теплотехнические измерения: учебник / Н.С. Долбикова,  
Л.М. Захарова, А.В. Кузнецова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2021. –  
292 с.

ISBN 978-5-7046-2431-8

В учебнике приведены современные методы и средства измерения различных теплотехнических параметров: температуры, давления, расхода, уровня и т.д. Рассматриваются погрешности измерений и способы их оценки, метрологические характеристики средств измерения, основные принципы подбора измерительного оборудования и построения функциональных схем теплотехнического контроля.

Для подготовки бакалавров по направлениям 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.03.03 «Энергетическое машиностроение». Предназначено для студентов ИТАЭ, ИЭВТ, ЭнМИ, ИГВИЭ.

**УДК 621.1**  
**ББК 31.3**

ISBN 978-5-7046-2431-8

© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2021

# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	9
Глава 1. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	10
1.1. Системы теплотехнического контроля и реализация информационных функций АСУТП ТЭС.....	10
1.2. Способы формирования измерительной информации .....	15
Контрольные вопросы и задания.....	15
Глава 2. МЕТРОЛОГИЯ. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА .....	21
2.1. Метрология как наука об измерениях.....	21
2.2. Государственная система обеспечения единства измерений .....	22
2.2.1. Единство измерений и методы его обеспечения .....	22
2.2.2. Международное взаимодействие в области метрологического обеспечения .....	24
2.2.3. Система обеспечения единства измерений России .....	29
2.3. Метрология в системе менеджмента качества .....	40
2.4. Метрологическая служба предприятия .....	41
2.4.1. Цели и задачи метрологической службы предприятия.....	41
2.4.2. Организационные принципы метрологической службы предприятий электроэнергетики.....	43
2.4.3. Автоматизация работы метрологической службы .....	46
Контрольные вопросы и задания .....	46
Глава 3. МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ .....	51
3.1. Основные метрологические понятия и требования .....	51
3.2. Измерения и их классификация.....	55
3.3. Основные характеристики измерений .....	58
3.4. Средства измерений и их классификация.....	60
3.5. Метрологические характеристики средств измерений .....	65
3.6. Оценка точности прямых технических измерений.....	72
3.7. Оценка точности прямых измерений с многократными наблюдениями.....	72
3.8. Оценка точности результата косвенных измерений.....	77
3.9. Оценка точности технических измерений, выполняемых измерительными системами .....	77

3.10. Метрологическое обеспечение АСУТП ТЭС.....	79
Контрольные вопросы и задания.....	80
Глава 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	82
4.1. Общие сведения .....	82
4.2. Стеклнные термометры .....	84
4.3. Манометрические термометры. Общие положения .....	85
4.4. Газовые манометрические термометры.....	87
4.5. Жидкостные манометрические термометры.....	87
4.6. Конденсационные манометрические термометры.....	88
4.7. Измерение температур термоэлектрическими термометрами.....	89
4.7.1. Основы теории ТЭП.....	90
4.7.2. Стандартные ТЭП.....	94
4.7.3. Удлиняющие термоэлектродные провода.....	96
4.7.4. Способы введения поправки на $E(t_0, 0)$ .....	96
4.7.5. Средства измерения и преобразования термоЭДС ТЭП.....	99
4.7.6. Компенсационный метод измерения термоЭДС ТЭП.....	102
4.7.7. Автоматические потенциометры .....	104
4.7.8. Нормирующие преобразователи с глубокой отрицательной обратной связью .....	107
4.8. Измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления .....	108
4.8.1. Стандартные ТПС .....	108
4.8.2. Методы измерения сопротивления ТПС.....	110
4.8.3. Уравновешенные мосты .....	111
4.8.4. Информационно-измерительные системы измерения температуры.....	113
4.8.5. Нормирующий преобразователь для ТЭП .....	114
4.8.6. Нормирующий преобразователь для ТПС .....	116
4.9. Пирометры. Бесконтактные методы измерения температуры ..	118
4.9.1. Законы излучения.....	119
4.9.2. Квасимонохроматический пирометр с исчезающей нитью	121
Контрольные вопросы и задания .....	125
Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ.....	126
5.1. Жидкостные манометры и дифманометры .....	127
5.2. Микроманометры .....	128
5.3. Деформационные манометры и дифманометры.....	130
5.3.1. Пружинные манометры .....	131
5.3.2. Сильфонные и мембранные манометры.....	131
5.3.3. Деформационные преобразователи давления.....	132

5.3.4. Дифференциально-трансформаторные преобразователи .....	133
5.3.5. Преобразователи с компенсацией магнитных потоков .....	139
5.3.6. Манометры с тензопреобразователями .....	143
Контрольные вопросы и задания .....	147
<b>Глава 6. ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВА .....</b>	<b>148</b>
6.1. Расходомеры переменного перепада давления с сужающими устройствами .....	148
6.1.1. Типы стандартных сужающих устройств .....	150
6.1.2. Уравнение расхода .....	151
6.1.3. Особенности измерения расхода пара .....	155
6.1.4. Оценка погрешности измерения расхода .....	155
6.2. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры .....	157
6.3. Электромагнитные (индукционные) расходомеры .....	159
Контрольные вопросы и задания .....	163
<b>Глава 7. ТЕПЛОСЧЕТЧИКИ .....</b>	<b>164</b>
7.1. Общие положения .....	164
7.2. Состав теплосчетчиков .....	165
7.3. Способы подключения теплосчетчиков и алгоритмы расчета количества теплоты .....	167
Контрольные вопросы и задания .....	170
<b>Глава 8. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ .....</b>	<b>171</b>
8.1. Дифференциальные уровнемеры .....	172
8.2. Емкостные уровнемеры .....	177
Контрольные вопросы и задания .....	182
<b>Глава 9. АНАЛИЗ ГАЗОВЫХ СРЕД .....</b>	<b>183</b>
9.1. Общие сведения .....	183
9.2. Термокондуктометрические газоанализаторы .....	185
9.3. Термохимические газоанализаторы .....	188
9.4. Магнитные газоанализаторы .....	189
9.5. Хроматографические газоанализаторы .....	192
Контрольные вопросы и задания .....	196
<b>Глава 10. АНАЛИЗ СОСТАВА ЖИДКИХ СРЕД .....</b>	<b>197</b>
10.1. Введение .....	197
10.2. Методы и средства анализа состава жидкостей. Общие сведения .....	198
10.3. Кондуктометрический метод анализа состава растворов. Кондуктометры .....	199

10.3.1. Общие сведения .....	199
10.3.2. Электродные кондуктометры .....	200
10.4. Потенциометрический метод анализа состава растворов. рН-метры .....	204
10.4.1. Теоретические основы .....	204
10.4.2. Измерительный электрод .....	206
10.4.3. Электродная система для измерения рН-раствора .....	210
10.4.4. Рабочий режим рН-метра .....	213
10.4.5. Третий режим работы – температурная компенсация .....	213
10.5. Устройства подготовки пробы .....	214
10.6. Стенды контроля водно-химического режима .....	217
Контрольные вопросы и задания .....	220
Глава 11. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ВЫБОРА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	221
11.1. Правила выбора технических средств измерения .....	221
11.1.1. Основные критерии выбора средств измерения .....	221
11.1.2. Определение требований к точности средств измерений .....	227
11.1.3. Оптимизация приборного парка средств измерений .....	238
11.2. Функциональные схемы технического контроля .....	239
11.3. Пример построения функциональной схемы теплотехнического контроля ПО ГОСТу 21.208-2013 .....	242
Контрольные вопросы и задания .....	248
Глава 12. ПЕРЕДАЧА, ХРАНЕНИЕ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ .....	249
12.1. Информативные параметры выходных сигналов средств измерения .....	249
12.2. Методы передачи информации в цифровых измерительных системах .....	254
12.3. Влияющие величины .....	282
Контрольные вопросы и задания .....	284
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	285
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	286



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ни одна отрасль промышленности, в том числе – энергетика и энергетическое машиностроение, немыслима без измерений. При этом в последнее время в энергетике используются агрегаты значительной единичной мощности. Соответственно, выросло количество измеряемых параметров, увеличилась скорость протекания процессов, вследствие всего этого повысились требования к измерительным приборам и информационно-измерительным системам в составе АСУТП [20, 27, 42].

Кроме того, для последних трех десятков лет характерно повсеместное широкое внедрение цифровой техники, в том числе и для целей измерений. Сейчас достаточно широко распространены микропроцессорные измерительные приборы, регуляторы и интеллектуальные датчики, микропроцессоры входят в состав самых разных измерительных преобразователей, от простых термодатчиков и термометров сопротивления до сложных устройств автоматического химического контроля [21, 19].

Все эти факторы делают необходимым создание нового учебника по теплотехническим измерениям, учитывающего описанные выше тенденции.

В данном учебном пособии рассмотрены общие вопросы метрологии, а также методы и средства измерения основных тепловых параметров – температуры, давления, расхода, уровня. Также рассматриваются методы и средства анализа состава жидкостей и газов, кроме того, изложены основные принципы подбора измерительного оборудования и составления схем теплотехнического контроля и автоматизации. В последней главе приводятся общие сведения о современных цифровых приборах, передаче измерительной информации с помощью промышленных протоколов и создании информационно-измерительных систем на их основе.

В пособии приводятся, в основном, общие сведения об измерительных приборах с целью иллюстрации отдельных методов измерений. Более подробную информацию о конкретных измерительных приборах можно найти на официальных сайтах фирм-производителей, часть из которых перечислены в списке литературы в конце книги.

Книга предназначена студентам бакалавриата, обучающимся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», также она может быть полезна при написании выпускной квалификационной работы и обучении в магистратуре по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

# Глава 1. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

## 1.1. Системы теплотехнического контроля и реализация информационных функций АСУТП ТЭС

На современном производстве система теплотехнического контроля является неотъемлемой частью автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП). Эта система предназначена для сбора, обработки, передачи и представления персоналу необходимой информации о ходе технологического процесса, работе оборудования и т.д. Рассмотрим эту систему более подробно.

На современных электрических станциях теплотехнический контроль представлен широким спектром информационно-измерительных систем, предназначенных для формирования измерительной информации о ходе технологического процесса, состоянии объекта и оборудования.

Измерительная информация – это количественные сведения о некоторых свойствах материального объекта, полученные опытным путем с помощью технических средств в результате их взаимодействия с материальным объектом [20, 21]. Далее для примера рассмотрим кратко систему теплотехнического контроля энергоблока тепловой электрической станции.

На рисунке 1.1 представлена упрощенная тепловая схема паротурбинного энергоблока [57]. В котёл поступает питательная вода и топливо, в данном случае – газовое. Топливо сжигается факельным способом, вода в трубах нагревается и превращается в пар, который далее нагревается до нужной температуры и поступает в голову цилиндра высокого давления (на схеме – ЦВД) турбины. После ЦВД пар снова поступает в котёл, где нагревается снова (происходит так называемый вторичный перегрев), после чего опять идет в турбину, но уже в голову цилиндра среднего давления (ЦСД) и далее в цилиндр низкого давления (ЦНД). На одном валу с турбиной находится генератор, вырабатывающий электроэнергию.

Отработав в турбине, пар идет в конденсатор, где охлаждается и конденсируется. Конденсатор представляет собой поверхностный теплообменный аппарат, куда для охлаждения и конденсации пара подается охлаждающая вода.

После конденсатора установлен конденсатный насос КН, который прокачивает конденсат через систему подогревателей низкого давления ПНД (обычно их четыре, на схеме для экономии места показан один), в которых происходит подогрев конденсата паром из отборов турбины, в деаэратор, где происходит удаление из воды агрессивных газов и также подогрев поступающего конденсата паром из отборов. Отборы на схеме на рис. 1.1 не показаны.

Далее питательный насос прокачивает воду через систему подогревателей высокого давления ПВД (обычно их три, на схеме для экономии места показан один), где также происходит подогрев воды паром из отборов, после чего питательная вода поступает в котел, и цикл повторяется. ПВД обычно представляют собой поверхностные теплообменные аппараты, ПНД и деаэратор – смешивающие теплообменные аппараты. Слив конденсата из ПВД может осуществляться в деаэратор (слив на схеме не показан).

На представленной на рис.1.1 схеме указаны точки, в которых производятся измерения основных параметров, которые также называют первичными технико-экономическими показателями (ТЭП). Таковыми являются [32]:

- температура как рабочего тела (вода, пар), так и подаваемого в котел воздуха, топлива (газа, мазута), металла труб и т. д;
- давление питательной воды, пара, газа, разрежение в топке котла, в конденсаторе;
- расход топлива, питательной воды, пара, воды на впрыски, сетевой воды (для теплофикационных блоков, на рис. 1.1 показана схема конденсационного энергоблока);
- уровень в барабане котла, в ПНД, в ПВД, в конденсаторе, в баке-расширителе (на схеме не показан);
- анализ состава газовых сред (например, уходящих из котла дымовых газов);
- анализ качества питательной воды и т.д.;
- учет количества тепла.

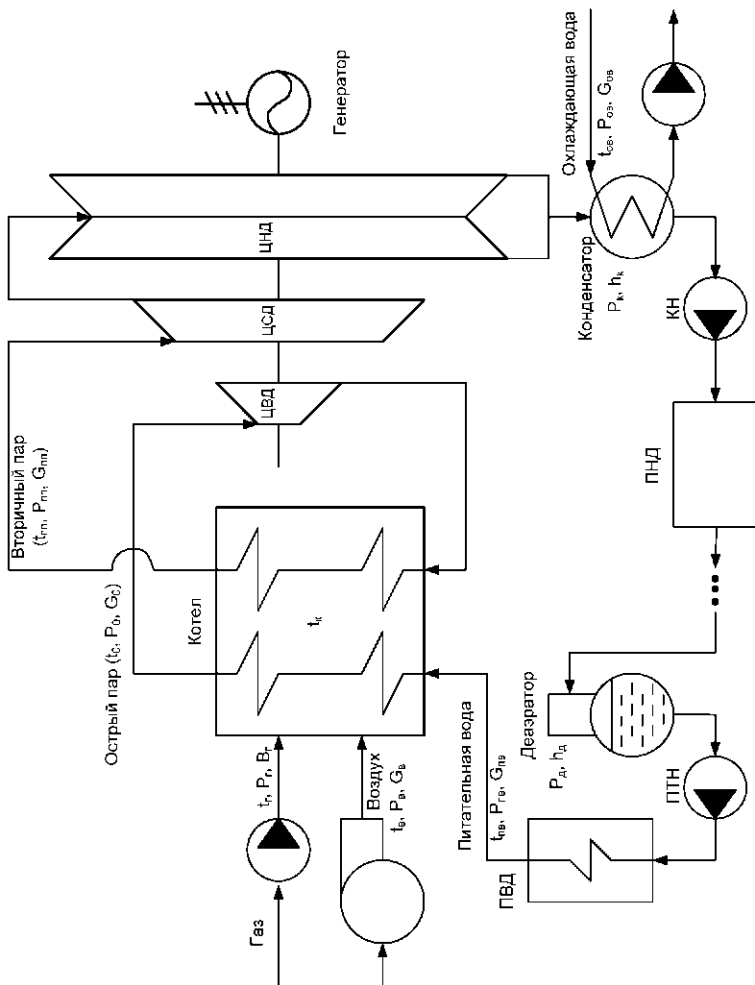


Рис. 1.1. Упрощенная тепловая схема паротурбинного энергоблока

В настоящее время единичная мощность тепловых и атомных энергоблоков значительно выросла, так, на Костромской ГРЭС работает энергоблок мощностью 1200 МВт [42], а на Ленинградской и Нововоронежской АЭС – энергоблоки с реакторами ВВЭР-1200, мощность которых составляет 1085 МВт.<sup>1\*</sup> Увеличение единичной мощности энергоблока приводит к усложнению тепловых схем, увеличению числа контролируемых параметров и, как следствие этого, к увеличению объема измерительной информации о технологических процессах и состоянии технологического оборудования.

В таблице 1.1 приведены примерные объемы контроля и автоматического регулирования в зависимости от мощности энергоблоков. Стоит отметить, что это только технологически необходимые объемы. Если же предусмотреть широкий спектр сервисных операций по обслуживанию технологического объекта управления, то количество первичной информации увеличивается в два-три раза [20].

Таблица 1.1

**Объемы контроля и автоматического регулирования  
в зависимости от мощности энергоблока**

Мощность энергоблока, МВт	Контролируемые параметры, шт.	Регулируемые параметры, шт.
200	600–750	80–100
300	1000–1200	100–120
500	~1400	~150
800	~1600	~200

Системы теплотехнического контроля и автоматизации являются составными частями одной системы – автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП).

Функции АСУТП делятся на информационные и управляющие (или функции управления) [20, 27, 30]. На рис. 1.2 представлена блок-схема функций АСУТП, где информационные функции, как имеющие непосредственное отношение к рассматриваемой теме, показаны более подробно. Информационные

\* Официальный сайт АО «Концерн Росатом» <https://www.rosenergoatom.ru/>

функции реализуются совокупностью ряда подсистем АСУТП, а именно информационно-измерительной, технологической сигнализации и т.д.

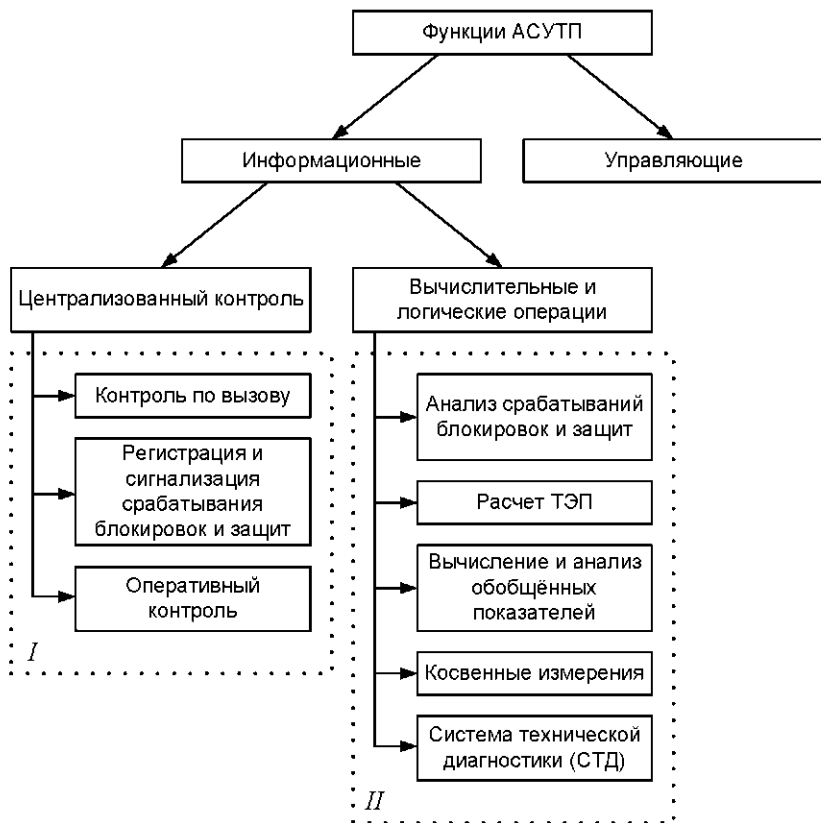


Рис. 1.2. Функции АСУТП

Как видно из схемы, представленной на рис. 1.2 информационные функции подразделяются на функции централизованного контроля и функции вычислительных и логических операций.

Централизованный контроль (на рис.1.2 данная группа функций обозначена I) включает:

- непрерывное или периодическое (контроль по вызову) измерение основных параметров технологического контроля и показателей состояния оборудования;

– обнаружение и отображение отклонения значений технологических параметров и состояния оборудования от установленных пределов;

– контроль, оперативное отображение, регистрацию и сигнализацию срабатывания блокировок и защит.

Вычислительные и логические операции (на рис. 1.2 данная группа функций обозначена *II*) – это расчет ТЭП, вычисление результатов косвенных измерений, анализ срабатываний блокировок и защит, а также система технической диагностики, вычисление и анализ обобщенных показателей эффективности работы как оборудования, так и средств АСУТП.

Рассмотренная схема (с группами функций *I* и *II*) соответствует современному состоянию организации информационных потоков и обработки информации на ТЭС, которая оснащена современными программно-техническими комплексами, например, ПТК «Квинт» [54], «Телеперм» [38], «Текон» [50] и др.

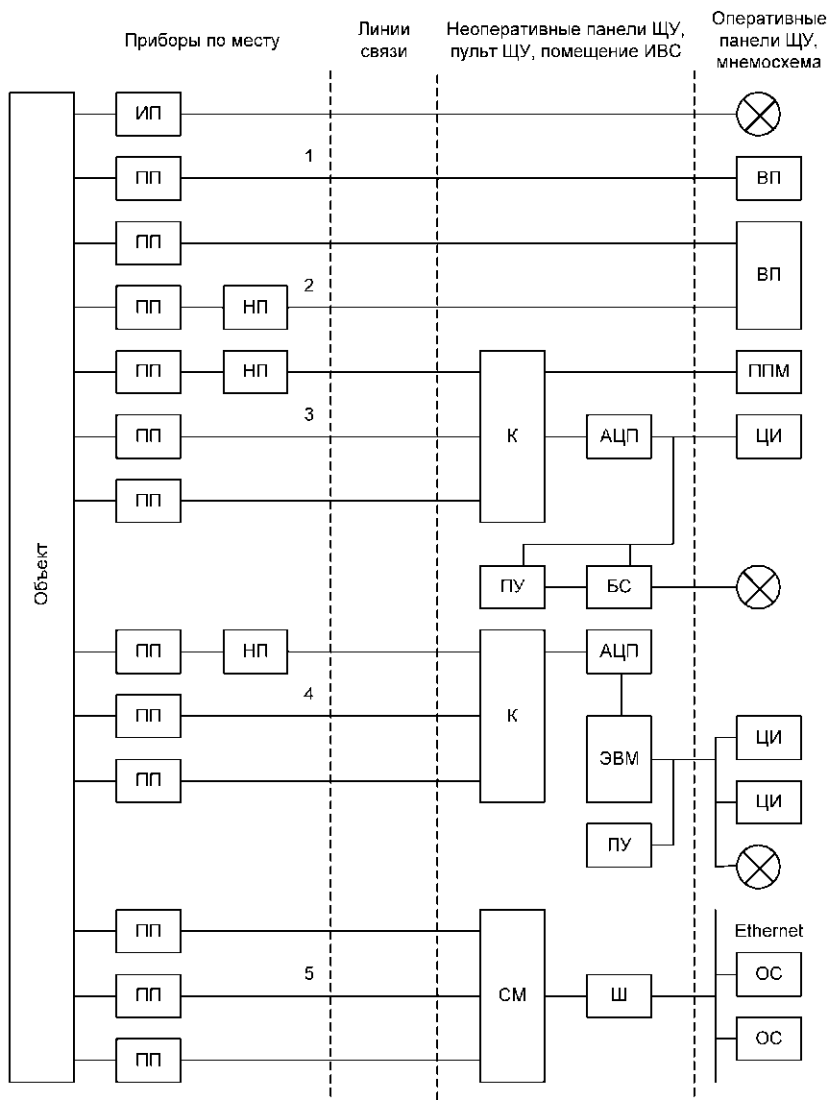
Однако, даже на старых ТЭЦ Мосэнерго, не говоря уже о станциях на периферии, зачастую существует только частичная реализация информационной подсистемы, а именно реализованы только функции централизованного контроля (*I*) посредством системам ИВ-500, СКП, «Саргон» [49] и других.

Работа информационных подсистем базируется на измерительной информации от первичных преобразователей и контролируется оператором блочного щита управления (БЩУ) с возможностью вмешательства в работу подсистемы.

## 1.2. Способы формирования измерительной информации

В зависимости от важности измеряемых параметров, сложности технологического объекта и мощности вычислительных управляющих машин существует несколько способов (или уровней) формирования измерительной информации.

На рис. 1.3 представлены пять уровней формирования информации в зависимости от развития (или усовершенствования) АСУТП [20, 27, 30].



**Рис. 1.3. Структура преобразования и представления измерительной информации**



Первый уровень (на рис. 1.3 обозначен «1», прочие уровни на этом рисунке также обозначены соответствующими номерами) представляет собой систему индивидуального контроля параметров.

Такие системы преобладают на объектах небольшой мощности или на отдельных элементах крупных объектов (например, для индивидуального управления котлом или турбиной).

Информация от первичных преобразователей (ПП) – термпар, термометров сопротивления или промежуточных измерительных преобразователей (ИП) (использующихся при измерении давления, расхода, уровня, а также анализаторов состава жидкости и газов) поступает на показывающие и (при необходимости) регистрирующие вторичные приборы (ВП), в которых при необходимости осуществляется сигнализация предельных отклонений контролируемых величин. Такие системы индивидуального контроля, как правило, представляют измерительные системы без применения компьютерной техники. Средства измерения ПП, ИП устанавливаются на технологическом объекте (термометры сопротивления, термопары, манометры, манометрические термометры) или вблизи его, например, на гребенках манометров и дифманометров.

Второй уровень (на рис.1.3 обозначен «2») – система индивидуального контроля, подобная первому уровню, но для множественного контроля параметров с однотипными выходными сигналами.

Измерительные системы представлены ПП и нормирующими преобразователями (НП) с выходами на ВП или через коммутатор (К) на приборы показывающие многоканальные (ППМ).

Рассмотренные системы индивидуального контроля используются в системах управления объектами любой сложности. В системах управления наиболее простыми объектами на их основе осуществляется представление информации о ходе технологического процесса и состоянии оборудования.

Третий уровень (обозначен «3» на рис. 1.3) представляет собой системы централизованного контроля (СЦК).

СЦК предназначены для выполнения информационных функций АСУТП первого уровня (смотри рис. 1.2): централизованного контроля, контроля по вызову (СКП), оперативного контроля, регистрации и сигнализации срабатывания блокировок и защит.

Системы контроля третьего уровня – это информационно-измерительные системы (ИИС). Структуры их отличаются большим разнообразием. Информация от ПП в виде естественного сигнала или унифицированного токового с НП поступает через коммутатор на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на устройство цифровой индикации (ЦИ) и регистрируется печатающими устройствами (ПУ).

Для реализации информационных функций АСУТП (т.е. регистрации и сигнализации срабатывания блокировок и защит) структура систем контроля, кроме перечисленных выше средств, включает в себя блок сравнения (БС), в котором значение измеряемой величины сравнивается с заданным значением – уставкой. При достижении значением измеряемой величины заданного уставкой срабатывает сигнализация, и ПУ регистрирует отклонение, а система сигнализации сообщает об этом оператору для принятия решения.

Четвертый уровень системы контроля (на рис. 1.3 обозначен «4») реализован на базе ИИС с включением в их структуру компьютерной техники (на рис. 1.3 обозначена как «ЭВМ»).

Эти системы имеют широкие функциональные возможности и предназначены для выполнения информационных функций АСУТП второго уровня (II) (смотри рис. 1.2), а именно: вычислительных и логических операций (расчета ТЭП, анализа срабатываний блокировок и защит, вычисления и анализа обобщенных показателей, косвенных измерений и технической диагностики).

В системах этого уровня информация от первичных преобразователей в виде естественного сигнала или унифицированного токового от нормирующего преобразователя поступает на вход коммутаторов (К), которые осуществляют последовательное подключение к аналогово-цифровому преобразователю. Сигналы от АЦП в цифровом виде поступают в ЭВМ, где производится выполнение всех информационных функций, перечисленных выше, с помощью специального программного обеспечения. Значения измеряемых величин, результаты расчета ТЭП, анализа состояния объекта и его элементов с целью диагностики технических ситуаций представляются оператору на мониторе (Мон), выводятся на цифровую печать (ЦП), а отклонение измеряемых величин от номинальных значений сигнализируются.

На экраны мониторов выводится буквенно-цифровая и графическая информация о значениях измеряемых параметров, которая накладывается на изображение фрагментов мнемосхем, в том числе активных.

Использование схем теплотехнического контроля четвертого уровня не исключает применение схем индивидуального контроля первого и второго уровней для наиболее ответственных параметров. Таким комбинированием достигается высокая надежность выполнения информационных функций АСУТП.

Пятый уровень (на рис. 1.3 обозначен «5») представляет собой системы контроля, работающие в составе микропроцессорного программно-технического комплекса (ПТК). В этом комплексе естественные сигналы от ПП поступают в микропроцессорные контроллеры, которые объединены контроллерной сетью в системные модули (СМ). Контроллеры производят всю совокупность обработки сигналов от ПП: нормализацию, фильтрацию, усреднение, линеаризацию, проверку достоверности и т.д. Через шлюзы (Ш) системные модули (СМ) подключены к системной шине Ethernet. К этой шине подключены также операторские станции (ОС), представляющие операторам всю информацию о ходе технологического процесса и состоянии оборудования, к ней же могут быть подключены абоненты, управляющие электростанцией или промышленным предприятием.

В данной главе были кратко рассмотрены информационные функции АСУТП и информационно-измерительные системы, являющиеся неотъемлемой составной частью АСУТП. Также описаны основные принципы реализации этих систем с применением современных средств контроля и управления. Таким образом, определено место средств и систем измерений в составе систем управления, что необходимо для дальнейшего изучения теплотехнических измерений и приборов.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Каковы основные параметры, измеряемые на паротурбинном энергоблоке?
2. К чему приводит увеличение единичной мощности энергоблока?

3. Как зависит количество измеряемых параметров от единичной мощности энергоблока?
4. На какие категории делятся функции АСУТП?
5. В чем отличие информационных функций АСУТП от управляющих?
6. Какие функции АСУТП относятся к функциям централизованного контроля?
7. Что относится к первому уровню формирования информации в АСУТП?
8. Какова структурная схема индивидуального контроля технологического параметра?
9. Какие параметры измеряются в конденсаторе паротурбинного энергоблока?
10. Для каких целей в составе АСУТП применяется программно-технический комплекс?
11. Из чего состоит системный модуль (СМ), и каковы его задачи?

## Глава 2. МЕТРОЛОГИЯ, МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

### 2.1. Метрология как наука об измерениях

Метрология как наука сформировалась в конце XIX в. Являясь наукой об измерениях, метрология должна опережать в своем развитии другие научные направления, так как точные измерения являются одним из основных путей совершенствования науки и производства.

Всдущую роль измерений в науке определил основоположник метрологии в России Д.И. Менделеев высказыванием: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры». Как бы перекликаясь с ним, основоположник метрологии в Англии Томпсон утверждал: «Каждая вещь известна лишь в той етепени, в какой ее можно измерить» [35].

Эти простые, но емкие высказывания не утратили своей актуальности и в настоящее время. Возможность получения достоверных и точных измерений (или, как еще можно сказать, измерительной информации) позволила осуществить стыковку космических кораблей с космической станцией, управление сложнейшими тепловыми объектами (например, ТЭС и АЭС) и приступить к реализации таких проектов, как создание умных домов (в литературе также часто используется без перевода термин «smart house»), умных городов («smart city») и умных электрических сетей («smart grid»).

Совершенствование метрологии, рост ее значимости неразрывно связано с развитием автоматизации. Именно автоматизация предъявляет высокие требования к точности, достоверности и сопоставимости результатов измерений. Для реализации последнего требования, связанного с обеспечением единства измерений, существует законодательная метрология (это один из разделов метрологии). Законодательная метрология включает комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, установленных государством и направленных на обеспечение единства измерений и однообразие средств измерений.

Измерения количественно характеризуют окружающий материальный мир. Можно выделить три главные функции измерений в отраслях человеческой деятельности:

– учет продукции, исчисляющейся по массе, длине, объему, расходу, мощности, энергии и т.д.;

– измерения физических величин технических параметров, характеристик процессов, состава и свойства вещества, проводимые при научных исследованиях, испытаниях и контроле продукции, в медицине, сельском хозяйстве и других отраслях;

– измерения, проводимые для контроля и регулирования технологических процессов (особенно в автоматизированных производствах) и для обеспечения нормального их функционирования.

Реализации последней функции измерений, а именно теплотехническим измерениям на тепловых объектах посвящен данный учебник.

## **2.2. Государственная система обеспечения единства измерений**

### ***2.2.1. Единство измерений и методы его обеспечения***

Единство измерений без преувеличения является краеугольным камнем не только метрологии, но и любой другой науки, да и вообще человеческой деятельности. Согласно принятым терминам и определениям единство измерений – это такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности известны с заданной вероятностью. Это необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разное время, с использованием различных методов и средств измерений, а также в различных по территориальному расположению местах.

Задача обеспечения единства (ОЕИ) измерений породила отдельный раздел метрологии – законодательную метрологию, которая отвечает за решение задач по регулированию взаимоотношений между государственными контролирующими организациями, службами метрологии предприятий и производителями средств измерений с целью обеспечения единства измерений.

В свою очередь обеспечение единства измерений – это деятельность, направленная на установление и применение научных, правовых, организационных и технических основ, правил, норм и средств, необходимых для достижения состояния измерений, при котором их результаты выражены в законных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы [9]. Для реализации подобной деятельности, безусловно, необходимо создание государственных и межнациональных систем обеспечения единства измерений: совокупности субъектов, норм, средств и видов деятельности, предназначенная для обеспечения единства измерений. Таким образом очевидно, что требуется организация государственного регулирования обеспечения единства измерений, когда управление субъектами, нормами, средствами и видами деятельности по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляется на основании нормативных правовых документов, принятых в установленном порядке. Основным документом системы государственного регулирования обеспечения единства измерений является Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [15]. Несмотря на то, что в самом законе отсутствует термин «Государственная система обеспечения единства измерений» это понятие устоялось в отечественной метрологической практике за несколько десятилетий своего существования. При этом можно утверждать, что, несмотря на то, указанный термин не упоминается в действующем законодательстве, сама система по-прежнему существует и развивается. Государственная система обеспечения единства измерений, как и ранее, включает в себя научную (фундаментальную и прикладную), правовую, организационную, нормативно-методическую и техническую составляющие [9].

Законодательная метрология предусматривает следующие способы обеспечения единства измерений:

- хранение и передача измерений от эталонов рабочим средствам измерений;
- контроль метрологических характеристик средств измерений на стадии производства;
- периодический контроль метрологических характеристик средств измерений;

- регламентация методик выполнения измерений;
- регламентация методик обработки данных измерения и форм представления информации.

Соответственно для реализации этих способов были разработаны следующие методы и инструменты:

- государственная система эталонов;
- методика калибровки средства измерений;
- методики первичной поверки средств измерений;
- методики периодической поверки средств измерений;
- стандартизованные и индивидуальные методики выполнения измерений;
- стандарты по обработке результатов измерений.

Другой важной задачей является создание международной системы обеспечения единства измерений. Нужно отметить, что метрология продвинулась в деле международной кооперации намного дальше, чем другие отрасли технического регулирования. Первой организацией, объединившей метрологов, стала Международная организация мер и весов (МОМВ), основанная в 1875 г. семнадцатью странами (а том числе и Россией), подписавшими Метрическую конвенцию, целью которой была унификация национальных систем единиц измерений и установление единых фактических эталонов длины и массы (метра и килограмма). В 1955 г. была основана Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), в которую на сегодняшний день входит 61 государство, в которых проживает около 90% всего населения земного шара, еще 67 имеют статус наблюдателей. Среди фундаментальных работ под эгидой МОЗМ необходимо выделить создание словаря по законодательной метрологии (VML), первое издание которого создавалось с 1961 по 1968 гг. Российская Федерация является одним из наиболее активных участников организации, а рекомендации МОЗМ широко применяются в отечественной метрологии.

### *2.2.2. Международное взаимодействие в области метрологического обеспечения*

Согласно РМГ 29-13 [11] метрологическое обеспечение познавательной, производственной деятельности и деятельности по оказанию услуг – это систематизированный набор средств и мето-



дов, направленных на получение информации о величинах, характеризующих свойства материальных объектов, обладающих свойствами, необходимыми для выработки решений по приведению объекта управления в целевое состояние.

Поскольку метрология затрагивает огромное количество организаций, как государственных, так и частных, в глобальном масштабе, то необходимо разбить субъекты метрологии по уровням. Общепринятый на текущий момент вариант разбиения представлен на рис. 2.1.



**Рис. 2.1. Деление глобальной системы метрологического обеспечения по уровням**

Международный уровень реализуется через организации, в которых представлено большинство государств мира. Среди таких организаций необходимо выделить прежде всего Международный комитет мер и весов (МКМВ), в состав которого также входит Международное бюро мер и весов (МБМВ), а основными задачами является создание и хранение международных эталонов основных физических величин, а также передача их точности национальным эталонам. Другим важным направлением долгое время являлось определение величин основных физических констант, что в итоге привело к постановке и успешному решению задачи переопределения основных единиц Международной системы СИ через универсальные физические константы для того, чтобы устранить зависимость единиц от какого-либо образца или материала. В 2005 г. была издана Рекомендация №1 МКМВ, одобряющая действия по разработке новых определений основных единиц: килограмма, ампера, кельвина и моля, основанных на фундаментальных физических константах. Далее 16 ноября 2018 г. 26-я Генеральная конференция по весам и мерам (КГПМ) единогласно проголосовала за новые определения основных единиц СИ: килограмма, ампера, кельвина и моля. Единицы будут определяться путем

задания точных численных значений для постоянной Планка ( $h$ ), элементарного электрического заряда ( $e$ ), постоянной Больцмана ( $k$ ) и постоянной Авогадро ( $N_A$ ) соответственно. Новые определения вступили в силу 20 мая 2019 г. Такого рода решения оказывают влияние на градуировку абсолютно всех без исключения средств измерения и, соответственно, на все системы метрологического обеспечения.

Другим активным участником международной системы метрологического обеспечения является уже упомянутая Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ). Эта организация решает задачи по гармонизации законодательных метрологических процедур путём внедрения эффективной инфраструктуры законодательной метрологии, обеспечивающей членов МОЗМ метрологическими руководствами по разработке национальных и региональных требований, касающихся производства и применения средств измерений в областях приложения законодательной метрологии:

- торговле;
- здравоохранении;
- безопасности (в производстве, на транспорте и т.д.);
- охране окружающей среды;
- официальном контроле (налоги, таможня и т.д.).

Деятельность по каждой принятой к разработке тематике сотрудничества осуществляется в рамках Технических комитетов МОЗМ (ТК) и их подкомитетах (ПК). Результаты работ рассматриваются и утверждаются централизованными органами (<https://gssso.ru/мозм/>). МОЗМ разрабатывает рекомендации, которые находят отражение в национальных системах метрологического обеспечения в части методик проведения измерений, правил и методов испытаний средств измерений, их калибровки, поверки, а также передачи точности от эталонов к рабочим средствам измерений.

Помимо этого, к результатам работы МОЗМ можно отнести следующие публикации (<https://www.oiml.org/>):

- Международный словарь законодательной метрологии (VIML);
- Международный документ D 1 «Основные положения для закона по метрологии» (2012 г.). Он определяет элементы, подлежащие рассмотрению при разработке национального законодательства, относящегося к метрологии.

- Международная публикация D2 «Узаконенные (официально допущенные к применению) единицы измерения».
- Международная публикация B15 «Стратегия МОЗМ (2011 г.)» Определяет значение законодательной метрологии, стратегию, цели и задачи МОЗМ на ближайшие годы, устанавливает обязанности членов МОЗМ по реализации Стратегического плана.

Очень важное место в международной системе метрологического обеспечения занимает Международная организация по стандартизации (ИСО/ISO). Ее цель – развитие стандартизации в мировом масштабе для улучшения товарообмена и взаимопомощи в научной, технической и экономической деятельности. ИСО пользуется консультативным статусом при ООН. Высшим руководящим органом ИСО является генеральная Ассамблея, созываемая раз в три года. Между ее сессиями организацией руководит Совет, собирающийся ежегодно. Текущую работу выполняет Центральный секретариат в Женева (Швейцария). Практическая работа по стандартизации ведется в технических комитетах. К настоящему времени ими подготовлено несколько десятков тысяч международных стандартов, носящих рекомендательный характер. В области метрологии стандартизацией занимается несколько технических комитетов. Например, ИСО ТК12 «Величины, единицы, обозначения, переводные коэффициенты и таблицы»; ИСО ТК57 «Метрология и свойства поверхностей» и др.

Кроме того, работы по метрологии и стандартизации в некоторых областях проводят и другие организации. По электротехнике этим занимается с 1881 г. Международные электротехнические конгрессы, а с 1904 г. – Международная электротехническая комиссия (МЭК или IEC, International Electrotechnical Commission). Россия вступила в МЭК в 1911 г., и возобновила участие в МЭК после революции в 1921 г. Работы МЭК сыграли большую роль в установлении систем электрических и магнитных единиц. В других, более узких областях, аналогичные работы ведут Международная комиссия по освещению, Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Международная конфедерация по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО), в частности, ее комитет ТК8 «Метрология», и другие.

Помимо глобальных организаций были созданы региональные структуры, которые координируют деятельность в области метрологического обеспечения и стандартизации, которые занимаются выработкой общих нормативных документов, регламентов, стандартов и рекомендаций, обязательных для стран участников.

Среди таких организаций нужно отметить такие организации как Европейское сотрудничество в области законодательной метрологии (WELMEC), Азиатско-тихоокеанский форум по законодательной метрологии (APLMF), а также наиболее важные для России Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ (МГС) и Евразийскую экономическую комиссию (в части комитета по техническому регулированию).

В частности, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ (МГС) осуществляет ведение реестров:

- межгосударственных стандартных образцов;
- стандартных справочных данных, действующих в государствах–участниках СНГ в области совместной разработки и использования данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- средств измерений в государствах – участниках СНГ;
- баз данных национальных эталонов;
- методик выполнения измерений;
- информации о деятельности по проверкам квалификации лабораторий на пространстве СНГ;
- межлабораторных сравнительных испытаний.

Важным направлением работы совета является организация и координация действий по разработке и пересмотру основополагающих документов в области обеспечения единства измерений. Среди наиболее актуальных документов в настоящее время можно выделить:

- ГОСТ OIML D 8 «Эталоны. Выбор, признание, применение, хранение и документация»;
- изменение ГОСТ 8.010-2013 «ГСИ. Методики выполнения измерений. Основные положения»;
- ГОСТ «ГСИ. Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения»;

- РМГ «ГСОЕИ. Общие требования к компетентности поверочных лабораторий»;
- пересмотр ПМГ 06-2001 «Порядок признания результатов испытаний и утверждения типа, поверки, метрологической аттестации средств измерений»;
- пересмотр ГОСТ 24555-81 «Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения»;
- разработка ПМГ «Порядок признания результатов периодической поверки и результатов калибровки».

Необходимо понимать, что региональные и международные организации прежде всего организуют и координируют процесс работы, тогда как непосредственно решение задач в той или иной области метрологии ложится на конкретные национальные институты. Это позволяет распределять задачи между различными государствами и ускорять процесс разработки и внедрения передовых знаний. В России перечисленные работы выполняются ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (Санкт-Петербург), ФГУП «ВНИИМС» (Москва), ФГУП «УНИИМ» (Екатеринбург), в Белоруссии – РУП «БелГИМ» (Минск), в Киве ГП НИИ «Система» (Кив).

В последние годы, когда глобализация экономики стала мощным трендом и усилилась важность международных организаций, чья деятельность направлена на взаимное признание методов и результатов, а также подтверждения соответствия стандартам в целях обеспечения безопасности. Метрология играет в этом процессе ключевую роль, поскольку обеспечивает единство измерений и, соответственно, возможность сравнения результатов.

### *2.2.3. Система обеспечения единства измерений России*

Согласно ст. 71 Конституции РФ в ведении Российской Федерации находятся в том числе стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени.

Как уже было сказано выше, основным документом в области обеспечения единства измерений в России является Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [15], целями которого являются:

- установление правовых основ обеспечения единства измерений в Российской Федерации;
- защита прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;
- обеспечение потребности граждан, общества и государства в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности;
- содействие развитию экономики Российской Федерации и научно-техническому прогрессу.

Тсующая метрологическая деятельность регламентируется постановлениями Правительства России. С одной стороны это помогает обеспечить оперативность принятия решений, а с другой снижает стабильность и консервативность системы, что крайне важно для метрологии.

Для реализации положений законов «Об обеспечении единства измерений» и о «Техническом регулировании», а также постановлений Правительства РФ разрабатываются и принимаются подзаконные акты – нормативные документы, устанавливающие правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов [15, 35].

К нормативным документам по метрологии, действующим на территории России, относятся:

- межгосударственные стандарты (ГОСТ) системы ГСИ;
- национальные стандарты (ГОСТ Р) системы ГСИ;
- правила по метрологии (ПР) системы ГСИ (около 30);
- рекомендации (гриф «МИ») системы ГСИ, разрабатываемые метрологическими институтами и утвержденными руководством этих институтов.

За разработку, хранение и распространение вышеперечисленных документов отвечает Управление метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). На основании нормативных документов Росстандарта предприятия разрабатывают ведомственные документы по обеспечению единства измерений, что и составляет систему мет-

рологического обеспечения предприятий. Нужно помнить, что документы отраслей и предприятий не должны нарушать обязательные требования государственных технических регламентов и стандартов. В целом систему можно представить в виде пирамиды, показанной на рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Система нормативной документации по метрологическому обеспечению в России**

Среди ведомственных документов можно выделить следующие:

- стандарты отраслей (могут разрабатываться и приниматься государственными органами управления в пределах их компетентности применительно к продукции, работам и услугам отраслевого значения);
- стандарты предприятий (могут разрабатываться и утверждаться предприятиями самостоятельно, исходя из необходимости их применения в целях обеспечения установленных требований, а также для совершенствования организаций и управления производством);
- стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений (как правило, разрабатываются для инновационной продукции);

- распорядительные документы (приказы, положения, инструкции, методические указания и т.п., касающиеся метрологической деятельности, определяются субъектами хозяйственной деятельности).

В настоящее время Росстандарт ведет активную работу по реструктуризации системы метрологического обеспечения в рамках стратегии создания Национальной инфраструктуры качества до 2025 г. В частности, предусмотрено объединение существующих метрологических институтов в единый Национальный институт метрологии, что позволит не только более эффективно использовать имеющиеся ресурсы, но и повысить унификацию подходов к метрологическому обеспечению.

Целями стратегии заявлены:

- стать мировым лидером в области метрологической науки и эталоностроения;
- стать испытательной базой, центром сертификации и калибровочной лабораторией №1 в стране.
- стать экспертной платформой притяжения компетенций и их ключевым проводником к потребителям через стандарты.

Государственное регулирование в области обеспечения единства измерений осуществляется в формах, определенных в законе об обеспечении единства измерений. Для организации единства измерений разработаны комплекс мер и нормативная документация, которые составили систему Федерального государственного метрологического надзора – контрольной деятельности в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Метрологический надзор осуществляется уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключается в систематической проверке соблюдения устанавливаемых законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий. Метрологический надзор осуществляется за:

- соблюдением обязательных требований в сфере государственного регулирования ОЕИ к измерениям, единицам величины и их эталонам, стандартным образцам и средствам измерений при их выпуске из производства, ввозе в РФ, продаже и применении на территории РФ;



- наличием и соблюдением аттестованных методик (методов) измерений;

- соблюдением государственной, коммерческой, служебной и иной охраняемой законом тайны.

Метрологический надзор распространяется на деятельность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, которые в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений осуществляют:

- измерения;

- вынук из производства эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений

- ввоз, продажу и применение на территории Российской Федерации средств измерений импортного производства;

- расфасовку товаров.

Федеральный государственный метрологический надзор осуществляется должностными лицами федеральных органов исполнительной власти при предъявлении служебного удостоверения и приказа (распоряжения) руководителя органа государственного надзора о проведении проверки, имеющими право:

- посещать объекты (территории и помещения) юридических лиц и индивидуальных предпринимателей в целях осуществления метрологического надзора во время исполнения служебных обязанностей;

- получать документы и сведения, необходимые для проведения проверки.

При выявлении нарушений должностные лица, которые осуществляют надзор, обязаны:

- запрещать выпуск из производства, ввоз на территорию РФ и продажу предназначенных для применения в сфере государственного регулирования ОЕИ средств измерений и другой, указанной выше продукции, не соответствующих обязательным требованиям;

- наносить на средства измерений знак непригодности в случаях, когда средство измерений не соответствует обязательным требованиям;

- давать обязательные к исполнению предписания и устанавливать сроки устранения нарушений;

- в случаях, предусмотренных законодательством РФ, направлять материалы о нарушениях в судебные и следственные органы и другие уполномоченные организации.

Среди методов государственного метрологического контроля можно выделить:

- утверждение типов средств измерений;
- утверждение типов стандартных образцов;
- поверка средств измерений;
- метрологическая экспертиза;
- аттестация методик (методов) измерений;
- аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей для выполнения работы и (или) оказания услуг в области обеспечения единства измерений.

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений – это документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа. *Стандартным образцом* называется образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной или более величины, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала). *Тип стандартных образцов* – совокупность стандартных образцов одного и того же назначения, изготавливаемых из одного и того же вещества (материала) по одной и той же технической документации. *Тип средств измерения* – совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технологической документации.

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений удостоверяется свидетельством, которое выдается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг в области обеспечения единства измерений. Как правило, это метрологические институты, входящие в структуру Росстандарта. При утверждении типа средств измерений устанавливают показатели точности, ин-

тервал между поверками средств измерений, а также методику поверки данного типа средств измерений (методика может быть как стандартной, так и индивидуальной, разработанной для конкретного типа средства измерений). Интервал между поверками средств измерений должен быть подтвержден либо экспериментальными исследованиями, либо расчетными характеристиками, зависит от стабильности того или иного средства измерений, и может быть от нескольких месяцев до нескольких лет. Эти данные оформляются в виде приложения к свидетельству и являются его неотъемлемой частью. Также в ходе проведения работ по утверждению типа средства измерений определяется метод нанесения знака утверждения типа. Как правило, этот знак должен наноситься на каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа, сопроводительные документы к указанным средствам измерений и на сопроводительные документы к стандартным образцам утвержденного типа. Если особенности конструкции средств измерений не позволяют нанести этот знак непосредственно на средство измерений, то он наносится только на сопроводительные документы.

После проведения работ по утверждению типа стандартных образцов и средств измерений сведения об этом вносятся в Государственный реестр средств измерений, и им присваивается номер этого реестра. Также данные заносятся в ФГИС Росстандарта «АРШИИ» и становятся общедоступными.

Нужно учитывать, что утверждение типов стандартных образцов и средств измерений имеет ограничение во времени, как правило, 5 лет, после чего требуется проведение работ по подтверждению соответствия типу измерений.

Одним наиболее частых метрологических действия является *поверка средств измерений* – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям. Все средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного метрологического контроля, обязательно подлежат поверке. Результаты поверки удостоверяются знаком поверки и (или) свидетельством о поверке. Знак поверки наносится на конструкцию средства измерений или (если это невозможно) на свидетельство о поверке.

Поверка средств измерений проводится аккредитованными в установленном порядке юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, которые передают сведения о результатах поверки средств измерений в ФГИС «АРШИН».

Поверка подразделяется на несколько видов в зависимости от задачи:

- первичная;
- периодическая;
- внеочередная;
- инспекционная;
- комплектная;
- поэлементная.

*Первичной* называется поверка средств измерений, производимая при выпуске их из производства или после ремонта, а также при ввозе их из-за границы партиями, при продаже.

*Периодической* называется поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени.

*Внеочередная поверка* производится вне зависимости от межповерочного интервала при эксплуатации (длительном хранении) средств измерений, из-за ухудшения его метрологических свойств или подозрения в этом, из-за нарушения знака поверки.

*Инспекционная поверка* проводится для выявления исправности средств измерений, выпускаемых из производства или ремонта и находящихся в обращении, при проведении государственного метрологического надзора за состоянием и применением средств измерений на предприятиях, складах, базах снабжения и в торговых организациях.

При *комплектной поверке* определяют метрологические характеристики средства измерений, присущие ему как единому целому. При *поэлементной поверке* устанавливают метрологические характеристики только элементов или частей средства измерений. Обычно поэлементную поверку проводят для измерительных установок или измерительных систем, когда неосуществима комплектная поверка. Например, для узлов учета тепловой энергии проводят поэлементную поверку теплосчетчика, комплектных парных термометров сопротивления, расходомеров и преобразо-

вателей давления. Это существенно упрощает и ускоряет процесс ввода системы в эксплуатацию, хотя и может привести к загромождению устанавливаемых точностных характеристик. При необходимости возможно проведение испытаний на утверждение типа средства измерений узла учета тепловой энергии непосредственно на объекте и в этом случае потребуются комплектная поверка.

Средства измерений, не прошедшие поверку, неисправные, и в том числе имеющие внешние повреждения или своевременно не поверенные, к эксплуатации не допускаются и не могут считаться средствами измерений. Государственной или ведомственной поверке подлежат все средства измерений.

В случаях, если средства измерений не предназначены для применения в сфере государственного метрологического контроля, например средства измерений, используемые в учебных целях, то они могут подвергаться поверке или калибровке в добровольном порядке.

*Калибровка средств измерений* – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений. Калибровка выполняется с использованием эталонов единиц физических величин, прослеживаемых к соответствующим государственным первичным эталонам, и осуществляется в добровольном порядке юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, получившими аккредитацию в области государственного метрологического контроля. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

Данные о калибровке не передаются в ФГИС «АРШИН». Сама калибровка, хотя и проводится по тем же методам, что и поверка, но не является достаточной для применения средства измерений в областях, где осуществляется государственный метрологический контроль.

*Метрологическая экспертиза* – это анализ и оценка правильности установления и совпадения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. *Метрологическими требованиями* называются требования, влияющие

на результат и показатели точности измерений, к характеристикам (параметрам) измерений, эталонов единиц величин, стандартных образцов, средств измерений, а также условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

Метрологическая экспертиза может проводиться в обязательном или добровольном порядке. Обязательную метрологическую экспертизу проходят:

- проекты правовых актов РФ в части требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений (такую экспертизу проводят государственные научные метрологические институты);
- стандарты, продукция, проектная, конструкторская, технологическая документация и другие объекты, которые входят в сферу государственного метрологического контроля (в этом случае экспертизу проводят юридические и физические лица, аккредитованные в установленном порядке).

В добровольном порядке может проводиться метрологическая экспертиза продукции, проектной, технологической документации и других объектов, в отношении которых не предусмотрена обязательная метрологическая экспертиза. Результаты метрологической экспертизы излагаются в экспертном заключении

*Аттестация методик (методов) измерений* – это исследование и подтверждение соответствия методик (методов) измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям. Аттестацию методик (методов) измерений, относящихся к сфере государственного регулирования единства измерений, проводят аккредитованные в установленном порядке юридические лица и индивидуальные предприниматели. Порядок аттестации устанавливается Росстандартом, а сведения об аттестованных методиках (методах) измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

*Аккредитация в области государственного метрологического контроля по обеспечению единства измерений* – это деятельность, осуществляемая в целях официального признания компетентности юридического лица или индивидуального предпринимателя выполнять работы и (или) оказывать услуги по обеспечению единства измерений.

Приказом Росаккредитации от 24 сентября 2019 г. № 186 утверждены методические рекомендации по описанию области аккредитации юридического лица или индивидуального предпринимателя, выполняющего работы и (или) оказывающего услуги по обеспечению единства измерений. Этот документ подготовлен с широким использованием методов международной организации по аккредитации лабораторий (ИЛАК), что позволяет углубить дальнейшую интеграцию отечественных метрологических институтов с глобальным рынком метрологических услуг.

Аккредитация осуществляется на основе принципов:

- добровольности;
- компетентности и независимости экспертов по аккредитации;
- применения единых правил аккредитации и их открытости и доступности;
- обеспечения равных условий лицам, претендующим на получение аккредитации.

К таким работам и (или) услугам относятся:

- аттестация методик (методов) измерений и (или) метрологическая экспертиза;
- испытания стандартных образцов в целях утверждения типа;
- испытания средств измерений в целях утверждения их типа;
- поверка средств измерений;
- калибровка средств измерений.

Отнесение аттестуемых методик (методов) измерений к определенному виду (области) измерений является ключевым при формировании области аккредитации. Под видами (областями) измерений понимают:

- измерения геометрических величин;
- измерения механических величин;
- измерения параметров потока, расхода, уровня, объема веществ;
- измерения давления, вакуумные измерения;
- измерения физико-химического состава и свойств веществ;
- теплофизические и температурные измерения;

- измерения времени и частоты;
- измерения электрических и магнитных величин;
- радиотехнические и радиоэлектронные измерения;
- измерения акустических величин;
- оптико-физические измерения;
- измерения характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант.

Область аккредитации по метрологической экспертизе в общем случае характеризуется комбинацией следующих параметров:

- типы объектов, подвергаемых метрологической экспертизе,
- области применения объектов, подвергаемых метрологической экспертизе.

### 2.3. Метрология в системе менеджмента качества

Система менеджмента качества в современном мире рассматривается как часть системы управления организацией [24]. Данная система должна обеспечивать соответствие качества и количества поставляемой продукции установленным в настоящее время требованиям, потребностям рынка и т.д. Задачу системы менеджмента качества можно сформулировать как постоянное улучшение качества выпускаемой продукции на фоне снижения затрат компании на его обеспечение, или, говоря проще, постоянное повышение эффективности производства и качества продукции.

Повышение эффективности производства и качества продукции требует максимальной достоверности объективной количественной информации о значениях параметров, характеризующих испытываемую продукцию. Такая информация может использоваться для оценки соответствия продукции своему назначению и установленным в нормативных документах требованиям.

Основными источниками информации о качестве продукции являются контроль и испытания, реализация которых связана с измерениями. Таким образом, можно заключить, что система менеджмента качества, фактически, неработоспособна без точной и достоверной измерительной информации, источником которой является информационно-измерительная система.



Кроме этого, в следующем параграфе, посвященном метрологической службе предприятия, будет показано, что одной из основных задач этой службы является работа над повышением эффективности метрологического обеспечения, что достигается применением методов, характерных прежде всего для систем менеджмента качества. Таким образом, можно заключить, что системы менеджмента качества и метрология весьма тесно взаимосвязаны.

## 2.4. Метрологическая служба предприятия

### 2.4.1. Цели и задачи метрологической службы предприятия

Ключевую роль в организации метрологического обеспечения играет *метрологическая служба* – структурное подразделение центрального аппарата федерального органа исполнительной власти и (или) его территориального органа, юридическое лицо или структурное подразделение юридического лица либо объединения юридических лиц, работники юридического лица, индивидуальный предприниматель, организующие и (или) выполняющие работы и оказывающие услуги по обеспечению единства измерений и (или) в области метрологического обеспечения.

С целью метрологического обеспечения производства на предприятиях различных форм собственности создаются метрологические службы или службы главного метролога, которые должны быть аккредитованы органами Росстандарта. В понятие *метрологического обеспечения (МО) производства* включают научные и организационные основы, технические средства, правила и нормы, обеспечивающие полноту, точность и достоверность контроля качества продукции на всех этапах ее производства, необходимые для управления современным производством и обеспечения стабильного уровня качества продукции. Метрологическое обеспечение охватывает все стадии жизненного цикла изделия, начиная с этапа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. На этом этапе устанавливают, а затем закладывают в конструкторскую и технологическую документацию параметры точности, обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики изделия и их допуски; производят выбор и обоснование необходимых средств измерений и контроля. При этом устанавливается:

- необходимая номенклатура контролируемых параметров комплектующих изделий, сырья, материалов, подлежащих входному контролю;

- возможность контроля этих параметров, а также наличие на предприятии необходимых средств и методов измерений и, при необходимости, приобретение соответствующей измерительной техники;

- наличие необходимой нормативно-технической документации и подготовленного обслуживающего персонала.

Конструктор или технолог могут выдать техническое задание на разработку новых средств контроля, измерений или испытаний параметров продукции или ее элементов и, в необходимых случаях, последующей процедуры утверждения типа средств измерений. Метрологические службы на предприятиях и в организациях в процессе производства осуществляют метрологический контроль и надзор за средствами измерений путем:

- поверки (калибровки) средств измерений;

- надзора за состоянием и применением средств измерений, с соблюдением метрологических правил и норм, а также нормативных документов;

- проверки своевременности предоставления средств измерений на поверку (калибровку);

- выдачи обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических норм и правил;

- проведения метрологической экспертизы.

В рамках МО производства осуществляется метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации, целью которой является анализ и оценка технических решений по выбору параметров, подлежащих измерению, установлению норм точности и по обеспечению методами и средствами измерений процессов разработки, изготовления, эксплуатации и ремонта изделий.

Значение МО производства для достижения высокого качества продукции определено рядом международных документов, в том числе стандартом ИСО 10012-1 «Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования», в котором сформулиро-

ваны требования к системе подтверждения пригодности оборудования, передаче размеров единиц, межповсрочным интервалам и др. Соблюдение этого стандарта является одним из условий аккредитации системы качества на предприятии.

#### ***2.4.2. Организационные принципы метрологической службы предприятий электроэнергетики***

Структура организации *метрологической службы предприятия* прежде всего должна обеспечивать выполнение целей и задач, описанных в предыдущем разделе учебника.

Основные задачи, права и обязанности метрологических служб органов государственного управления и юридических лиц независимо от форм собственности последних определены в документе ПР 50.732-93 «Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления и юридических лиц».

Согласно этому положению, метрологическая служба государственного органа управления представляет собой систему, образуемую приказом руководителя государственного органа управления, которая может включать:

- структурные подразделения (службу) главного метролога в центральном аппарате государственного органа управления;
- головные и базовые организации метрологической службы в отраслях и подотраслях, назначаемые государственным органом управления;
- метрологические службы предприятий, объединений, организаций и учреждений.

В целесообразных случаях допускается возложение обязанностей по выполнению работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений приказом руководителя государственного органа управления на ответственных должностных лиц центрального аппарата.

Головные и базовые организации метрологической службы определяются из числа ведущих научно-производственных (производственных) объединений, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических организаций, независимо от форм собственности, для выработки технической политики и

координации работ в области обеспечения единства и требуемой точности измерений в отрасли (подотрасли) или иных областях деятельности, закрепленных за государственным органом управления или юридическим лицом.

Метрологические службы юридических лиц (предприятий, организаций, учреждений) независимо от их подчиненности и форм собственности образуются, как правило, в виде самостоятельных структурных подразделений для выполнения задач по обеспечению единства и требуемой точности измерений при проведении исследований, разработок, испытаний, в производстве и (или) эксплуатации продукции или иных областей деятельности, закрепленных за юридическим лицом, а также для осуществления метрологического контроля и надзора, и возглавляются главными метрологами.

В состав метрологических служб могут входить самостоятельные калибровочные лаборатории, а также структурные подразделения по ремонту средств измерений. Допускается возложение отдельных функций метрологической службы на иные структурные подразделения юридических лиц.

В составе концернов, акционерных обществ, ассоциаций, межотраслевых объединений и других объединений юридических лиц по решению руководящих органов объединения может создаваться аналогичная структура метрологической службы, включающая службу главного метролога объединения, головные и базовые организации метрологической службы, выполняющие свои функции на основании договоров с предприятиями, метрологические службы предприятий (организаций), возглавляемые главными метрологами.

Для предприятий электроэнергетики фирма ОРГРЭС разработала «ПОЛОЖЕНИЕ О МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ», которое было принято и введено в действие в 2008 году. Согласно этому документу целью создания метрологической службы электроэнергетики является обеспечение единства и требуемой точности измерений при производстве, распределении, реализации электрической и тепловой энергии, а также обеспечение контроля и управления надежной и экономичной эксплуатации энергетического оборудования и для осуществления метрологического контроля и надзора в электроэнергетике.

Основными задачами метрологической службы электроэнергетики для реализации этой цели являются:

- повышение уровня развития измерительной техники, внедрение современных методов и средств измерения;
- внедрение автоматизированного контрольно-измерительного оборудования;
- внедрение информационно-измерительных систем и комплексов, в том числе в составе АСУ ТП, АИИС КУЭ и ОИК АСДУ (далее – СИ), эталонов, применяемых для калибровки средств измерений;
- осуществление метрологического контроля путем калибровки СИ, проверки своевременности представления СИ на поверку;
- осуществление метрологического надзора за состоянием и применением СИ, аттестованными МВИ, эталонами единиц величин, применяемых для калибровки СИ, соблюдением метрологических правил и норм, государственных и отраслевых нормативных документов по обеспечению единства измерений.

Помимо вышперчисленных задач на метрологические службы предприятия возлагают следующие обязательства:

- выдача обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм;
- проверка своевременности представления средств измерения на испытания для утверждения типа, а также на поверку и калибровку;
- анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии;
- проведение анализа состояния метрологического обеспечения производства;
- разработка и внедрение нормативно-технической документации (НТД);
- участие в разработке продукции и подготовки ее к сертификации;
- организация и проведение ремонта СИ;
- организация обучения для повышения квалификации работников предприятия.

Кроме этого, одной из основных задач является работа над повышением эффективности метрологического обеспечения, что достигается применением методов, характерных прежде всего для систем менеджмента качества:

- ревизия и оптимизация контрольного, измерительного и испытательного оборудования;
- замена морально устаревшего измерительного оборудования современным, внедрение новых методов измерений;
- автоматизация измерительных процессов;
- оптимизация точности измерений по экономическому критерию: анализ степени важности измерительной информации, использование более точных средств измерений на ответственных участках, использование средств измерений с более грубым классом точности, где это целесообразно;
- анализ расчета суммарных погрешностей измерений, переход, где это целесообразно, от арифметического суммирования к геометрическому;
- совершенствование процедур поверки, калибровки, ремонта средств измерений с учетом экономической эффективности: внедрение новых эталонов, аккредитация метрологической службы и т. д.
- организация на предприятии экспертизы конструкторской и технологической документации;
- повышение профессионального уровня персонала, занимающегося вопросами метрологического обеспечения;
- упорядочение структуры службы, занимающейся метрологическим обеспечением.

В целом метрологическая служба предприятия является одним из ключевых элементов в части создания и поддержания системы обеспечения качества выпускаемой продукции на всех стадиях ее жизненного цикла.

При этом нужно учитывать, что для малых и средних предприятий рекомендуется вместо организации метрологических служб назначать лиц, ответственных за обеспечение единства измерений.

### *2.4.3. Автоматизация работы метрологической службы*

В настоящее время внедрение автоматизации любых производственных процессов является непременным условием сохранения конкурентоспособности предприятия. Не является исключением и метрологическое обеспечение.

В Российской Федерации разработаны и внедрены информационные системы на всех уровнях системы обеспечения единства измерений. На государственном уровне функционирует Федеральная Государственная Информационная Система Росстандарта «АРШИН», поддержку которой осуществляет Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

ФГИС Росстандарта «АРШИН» объединяет и систематизирует следующую информацию:

- сведения о средствах измерения утвержденного типа;
- сведения о результатах поверки средств измерений.

Непосредственно для предприятий разрабатываются собственные решения по организации метрологического обеспечения в составе автоматизированной системы управления предприятием. Существуют также разработки на базе популярных ERP-систем, которые позволяют получить оптимизированное под нужды заказчика решение с минимальными затратами.

К таким системам относится, например, система автоматизации метрологической деятельности на популярной и широко распространенной платформе 1С Предприятие 8.3 – «Метрология 3.0.» Эта система может быть использована предприятиями, занимающимися как профессиональной метрологической деятельностью (например, государственными центрами сертификации, метрологии и измерений, метрологическими институтами, организациями, авторизованными на право поверки средств измерений, производителями и поставщиками средств измерений), так и любыми другими предприятиями, где есть необходимость в организации метрологической службы. Функционал этой системы очень широк, позволяет решать все задачи в части метрологического обеспечения и может быть использован в качестве примера, поскольку хорошо описан.

Система «Метрология 3.0» прежде всего предназначена для решения следующих задач:

- повышение производительности труда метрологов за счет автоматизации процессов;
- предоставление достоверной информации о работе метрологической службы, загрузки как оборудования, так и сотрудников, этапов выполнения планов для принятия управленческих решений;

- ведения реестров о сроках действия поверок и аттестаций, включая автоматическую рассылку уведомлений об окончании их срока действия;

- отслеживания местонахождения средств измерения и времени выполнения работ;

- предотвращения ошибок в сведениях, передаваемых в Федеральный информационный фонд, на этапе оформления документов метрологами;

- учета бланков строгой отчетности и наклеек;

- автоматизации заполнения аккредитационных форм;

- автоматического создания регламентированных отчетов.

В зависимости от специфики предприятия возможно применение различных функциональных блоков системы Метрология 3.0. Так для предприятий, ведущих профессиональную метрологическую деятельность необходим модуль учета метрологических услуг, который обладает следующими возможностями:

- учет поверок и калибровок средств измерений, подготовка комплекта документов, печать свидетельств о проведении поверки, формирование отчетов;

- учет проверок индикаторов и контрольного оборудования, аттестации эталонов и испытательного оборудования;

- планирование загрузки поверителей и эталонов;

- учет материалов строгой отчетности: клейм, наклеек, бланков свидетельств;

- автоматическая рассылка напоминаний о приближающейся дате следующей поверки;

- учет движения средств измерений с автоматическим оповещением об этапах выполнения заказов;

- автоматический обмен данными с ФГИС Росстандарта «АРШИН».

В том случае если система «Метрология 3.0» используется для работы с собственным оборудованием, то достаточно использовать следующие функциональные блоки:

- регистрация приема и выдачи средств измерений для проведения работ (поверки, калибровки, проверки индикаторов, ремонта, технического обслуживания, аттестации) с формированием стандартных печатных форм учета;



- автоматическая рассылка напоминаний о приближающейся дате следующей поверки;
- автоматическое уведомление ответственных лиц о назначенных работах с возможностью перенаправления и контроля выполнения задач исполнителями.

Данная глава рассматривала метрологию как науку, а также общие вопросы единства измерений и методы его обеспечения в России и за рубежом, международное сотрудничество в области метрологии и деятельность международных метрологических организаций. Кроме того, в данной главе рассматривались метрологическое обеспечение и метрологическая служба предприятия, некоторые вопросы законодательной метрологии, а также роль и место метрологии в системе менеджмента качества.

Далее рассмотрим основные термины и определения метрологии, виды измерений и метрологические характеристики средств измерений.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Какие функции выполняет законодательная метрология?
2. Что называется единством измерений?
3. Для чего нужно обеспечивать единство измерений?
4. На какие уровни делится глобальная система метрологического обеспечения?
5. Когда и кем была основана Международная организация мер и весов?
6. Каким образом сейчас определяются основные единицы системы СИ?
7. Какую роль в международной системе метрологического обеспечения играет Международная организация по стандартизации?
8. Каким составом ведется межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ?
9. Какой документ является основным в области обеспечения единства измерений в Российской Федерации?
10. Какая организация в Российской Федерации разрабатывает и принимает стандарты отраслей?

11. Какие организации в Российской Федерации осуществляют метрологический надзор, и в чем он заключается?
12. Какие существуют методы государственного метрологического контроля?
13. Что называется поверкой средства измерения?
14. Какие виды поверки средств измерения существуют?
15. Что называется аккредитацией в области государственного метрологического контроля по обеспечению единства измерений?
16. Какова роль метрологии в системе менеджмента качества?
17. Что входит в понятие «метрологическое обеспечение предприятия»?
18. Чем занимается метрологическая служба предприятия?
19. Для чего предназначена система «Метрология 3.0»?

## Глава 3. МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

### 3.1. Основные метрологические понятия и требования

В любой отрасли человеческой деятельности существует своя система терминов или терминология. *Метрологическая терминология* – это специализированный научный язык метрологии. Рассмотрим ниже основные метрологические термины.

Большой вклад в упорядочение отечественной метрологической терминологии внес профессор М.Ф. Маликов. На базе его научных работ был разработан стандарт на терминологию – ГОСТ 16263 – 70 ГСИ. «Метрология. Термины и определения». В настоящее время этот ГОСТ заменен на Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29 – 2013 «Метрология. Основные термины и определения».

Основным понятием метрологии является само слово «метрология». Это слово образовано из двух греческих слов: «метрон» – мера и «логос» – учение. Таким образом, дословный перевод слова «метрология» – учение о мерах [4].

*Метрология* в современном понимании – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, и способах достижения требуемой точности [10, 19].

Раскрывая содержание каждого слова данного определения, можно выстроить общую картину знаний, охваченных данной наукой.

*Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Простейшим примером измерения является определение температуры воздуха с помощью термометра или длины стола с помощью линейки.

В первом случае физическая величина – это температура воздуха, специальное техническое средство – это термометр; во втором – длина стола и линейка соответственно. Однако на современном тепловом объекте с высоким уровнем автоматизации имеют место более сложные измерения, требующие для их выполнения комплекса специальных технических средств измерения – измерительных систем (ИС).

Важным понятием метрологии является единство измерений, о котором уже говорилось выше. Напомним, что *единство измерений* – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной доверительной вероятностью [25, 35]. Единство измерений необходимо для сопоставления результатов измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений. На тепловых объектах для обеспечения единства измерений созданы специальные службы, занимающиеся метрологическим обеспечением систем управления. Эти вопросы рассматривались во второй главе данного пособия.

*Точность измерений* – одна из характеристик качества измерений, отражающая степень близости к нулю погрешности результата измерений.

Термин «точность» применим лишь для сравнения результатов или относительной характеристики методов измерений, например, точность измерения термо-ЭДС компенсационным методом (потенциометром) выше, чем при измерении ее прямым методом с помощью милливольтметра.

Точность измерений количественно характеризуется погрешностью измерений.

*Физическая величина* – это свойство, общее в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. К физическим величинам в теплоэнергетике относятся: температура, давление, расход, уровень, концентрация определяемого компонента в газовой смеси, влажность, концентрация вещества, растворенного в воде и др.

Рассмотрим смысл определения «физическая величина» на следующем примере: температура – это величина, которая характеризует степень нагретости тела, т. е., свойство, общее в качественном отношении для многих объектов (нагретыми могут быть камни, здания, вода и т.д.), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта (тело может быть более нагрето или менее, таким образом, его температура будет больше или меньше). Для выражения количественного содержания свойства (степени нагретости) употребляется слово «размер» физической величины.

*Размер физической величины* – понятие, необходимое для определения количественного содержания того или иного свойства в данном материальном объекте, системе, явлении или процессе. Размер существует реально, независимо от того, знаем мы его или нет, так как он является количественной определенностью физической величины.

Количественная оценка конкретной физической величины, выраженная в виде некоторого числа единиц данной величины, называется «*значением физической величины*». Отвлечённое число, входящее в «значение» величины, называется *числовым значением*. Важно понимать, что числовое значение изменяется в зависимости от принятой единицы измеряемой величины, а размер ее остается постоянным.

Если обозначить измеряемую величину через  $Q$ , единицу величины – через  $U_1$ , а числовое значение – через  $n_1$ , то

$$Q = n_1 U_1. \quad (3.1)$$

Размер величины  $Q$  не зависит от выбора единицы, чего нельзя сказать о числовом значении  $n$ , которое целиком определяется выбором единицы. Если для выражения размера величины  $Q$  вместо единицы  $U_1$  применить единицу  $U_2$  ( $U_2 \neq U_1$ ), то неизменный размер  $Q$  будет выражен другим числовым значением:

$$Q = n_2 U_2, \quad (3.2)$$

где  $n_1 \neq n_2$ . В качестве примера описанного явления можно привести перевод температуры из одних единиц в другие, например, из градусов по шкале Цельсия в градусы по шкале Фаренгейта или Кельвина, перевод температуры из джоулей в калории, расстояния из километров в мили.

Размеры разных единиц одной и той же физической величины различны.

Так, размер одного градуса по Цельсию отличается от размера одного градуса по Кельвину; размер метра – от размера фута и т.п.

Рассмотренный термин «физическая величина» можно заменить краткой формой основного термина, т.е. словом «величина». Его можно применять для описания физических величин, например, температуры, давления, влажности и т.п. Однако сло-

вом «величина» часто пытаются выразить размер данной конкретной физической величины. Это неверно, говорить «величина температуры» нельзя, так как в этом случае получается величина величины. Следует говорить «значение температуры».

Вопросы поверки, как относящиеся, в том числе, к законодательной метрологии, рассматривались выше во второй главе. Напомним, что *поверка* – это совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы или другими уполномоченными на то органами или организациями с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям [25, 35]. Поверке подвергаются средства измерений при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту. Перечни групп и порядок представления средств измерений, подлежащих поверке, утверждаются Госстандартом России. Положительные результаты поверки средств измерений удостоверяются поверительным клеймом или свидетельством о поверке.

Необходимо различать поверку и калибровку.

*Калибровка* – это совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору [25, 35]. Калибровке подвергаются средства измерений, которые не подлежат поверке. Калибровка средств измерений производится метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчиненных государственным эталонам единиц величин. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах. Порядок аккредитования на право выполнения калибровочных работ и выдачи сертификата о калибровке или нанесения калибровочного знака, требования к выполнению калибровочных работ устанавливаются Госстандартом России. Метрологические службы теплоэнергетических предприятий на основе договоров, заключаемых с органами Государственной метрологической службы, имеют аккредитацию на право проведения калибровочных работ и соответственно несут ответственность за надлежащее выполнение этих работ.

*Градуйровка средств измерений* – нанесение отметок на шкалу или определение значений измеряемой величины, соответствующих уже нанесенным условным отметкам. Целью градуировки является определение градуировочной характеристики средств измерений. В отличие от «повски», «градуировка» не дает заключение о точности средств измерений.

### 3.2. Измерения и их классификация

*Измерение*, определение которого было дано выше в этой главе, является основополагающим понятием метрологии. Существует несколько видов измерений. Они подразделяются на группы на основании характера зависимости измеряемой величины от времени, на основании способов получения результата измерений, а также способов выражения этого результата.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на статические и динамические [35, 18, 20].

*Статические измерения* – это измерения физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

В свою очередь, *динамические измерения* – измерения физической величины, изменяющейся во времени.

К статическим измерениям можно отнести измерения температуры или влажности на определенном интервале времени, а к динамическим – измерения пульсирующего давления, вибраций, расхода.

В зависимости от способа получения результатов, измерения делятся на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

*Прямыми измерениями* называются измерения, результат которых получается непосредственно из опытных данных. При прямых измерениях результат выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина. Прямые измерения являются весьма распространенным видом технических измерений. К ним относятся измерение температуры термометром, давления – манометром и т.п.

К *косвенным измерениям* относятся те, результат которых получается на основании прямых измерений нескольких других величин, связанных с искомой величиной определенной функциональной зависимостью:  $Y=f(X_1, X_2, \dots)$ , где  $X_1, X_2, \dots$  – значения величин, измеряемых прямым способом.

Примерами косвенных измерений являются определение площади или объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, расхода воды или пара по измерению перепада давления на сужающем устройстве, отпущенного потребителю тепла с помощью теплосчетчика и т.п. Роль косвенных измерений особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению, например, определение технико-экономических показателей тепловых электростанций.

*Совокупные измерения* – одновременно производимые измерения нескольких одноименных величин, при которых искомую величину определяют решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин [35, 21].

Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора (калибровка) по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь.

Такие измерения характерны для поверочных метрологических служб.

*Совместные измерения* – производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

Примером совместных измерений является определение температурного коэффициента электрического сопротивления  $\alpha$  медного терморезистора, как результат одновременно производимых прямых измерений двух разноименных величин: температуры и электрического сопротивления:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (3.3)$$

Исходя из условий, определяющих точность результата, измерения можно разделить на три группы: измерения максимальной точности, контрольно-поверочные и технические.

*Измерения максимальной точности, достижимой при существенном уровне техники*, – это, прежде всего, эталонные измерения, связанные с максимальной возможной точностью воспроизведения установленных единиц физических величин и измерение физических констант.



*Контрольно-поверочные измерения* - это измерения, погрешность которых не должна превышать некоторого заданного значения.

Например, при поверке средств измерений, выполняемой в нормальных условиях эксплуатации по определенной методике, погрешность их не должна превышать предела основной допускаемой погрешности, заданной классом точности.

*Технические измерения* это измерения, погрешность результата которых определяется метрологическими характеристиками средств измерений, выполняющих данное измерение.

К техническим измерениям относятся все измерения, выполняемые на тепловых объектах. Эти измерения могут быть выполнены как с использованием одного средства измерения, так и измерительными системами. Погрешности результата таких измерений оцениваются по определенным методикам и будут рассмотрены ниже.

По способу выражения результатов измерений различают абсолютные и относительные измерения.

*Абсолютными* называют измерения, которые основаны на прямых измерениях одной или нескольких основных величин или на использовании значений физических констант.

Результаты абсолютных измерений выражены обычно в единицах измеряемой физической величины. Примером абсолютных измерений может служить определение температуры в градусах, уровня в метрах, силы электрического тока в амперах и др.

*Относительными* называются измерения отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Результаты относительных измерений выражены в процентах. Примером таких измерений является измерение относительной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в  $1 \text{ м}^3$  воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данной температуре.

### 3.3. Основные характеристики измерений

Основными характеристиками измерений являются: принцип измерений, метод измерений, погрешность, правильность и достоверность измерений.

*Принцип измерения* – физические явления или их совокупность, положенная в основу измерений [21, 35].

Например, при измерении температуры термометрами расширения физическим явлением, положенным в основу измерения в этом случае является объемное расширение термометрического вещества при изменении температуры. Измерение температуры термоэлектрическими преобразователями (термопарами) производится с использованием термоэлектрического эффекта, т.е. совокупности физических явлений открытых учеными Томпсоном и Зеебеком. При измерении температуры пирометрами используются физические законы излучения, открытые для абсолютно черных тел.

*Метод измерений* – это прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей в соответствии с реализуемым принципом измерения. Метод измерения обычно обусловлен устройством средства измерения. Например, при измерении температуры термоэлектрическим преобразователем, совокупность принципа измерения (наведение термо-ЭДС), и технического средства измерения (милливольтметра) дает метод непосредственной оценки, а при измерении термо-ЭДС потенциометром получается уже другой метод измерения – нулевой или компенсационный.

*Погрешность измерений* – это отклонение результата измерения от истинного (или действительного) значения измеряемой величины. На практике вместо понятия «истинное значение» измеряемой величины пользуются понятием «действительное значение» измеряемой величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, насколько позволяют выбранные эталонные средства измерения методики проведения эксперимента. То есть, в качестве истинного значения измеряемой величины, фактически, используется действительное значение, найденное с помощью эталонных средств измерения.

Причинами погрешности измерений являются несовершенство методов и средств измерений, отклонение условий проведения измерений и субъективные особенности экспериментатора.

Погрешность измерения включает в себя несколько составляющих:

- погрешность средств измерений (нормируемые метрологические характеристики);
- погрешность метода измерения;
- методическая погрешность;
- субъективные погрешности;
- погрешность установки.

Под *погрешностью метода* измерений понимают погрешность, происходящую от несовершенства метода измерений. Она должна учитываться при оценке погрешности средства измерений или погрешности результата измерений.

*Субъективные* погрешности (возникающие при неавтоматических измерениях) вызваны индивидуальными особенностями наблюдателя. Например, запаздывание или опережение в регистрации момента какого-либо сигнала, неправильная интерполяция при отсчитывании показаний в пределах одного деления шкалы, явление параллакса от неправильного визирования взгляда наблюдателя на отсчетное устройство (стрелку) и т.д.

*Погрешности установки* возникают вследствие неправильной установки стрелки измерительного прибора на начальную отметку шкалы или небрежной установки средства измерений, например, не по отвесу или уровню.

*Методические погрешности* измерений представляют собой такие погрешности, которые определяются условиями (или методикой) измерения величины (давления, температуры и т.д.) и не зависят от точности применяемых средств измерений. Методическая погрешность может быть вызвана, например, добавочным давлением столба жидкости в соединительной линии, если прибор, измеряющий давление, будет установлен ниже или выше места отбора давления. При измерении температуры термоэлектрическим преобразователем методическая погрешность обусловлена условиями теплообмена со средой, температура которой измеряется, или нарушением температурного поля объекта датчиком в процессе измерения.

Все погрешности измерений, независимо от причин их возникновения, разделяют на систематические, случайные и грубые (или промахи).

Погрешность, которая остается постоянной или меняется по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины, называется *систематической*. Систематическую погрешность можно устранить введением поправки. *Поправка* – это значение систематической погрешности, но взятое с обратным знаком.

Погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом, как по значению, так и по знаку при повторных измерениях одной и той же величины, называется *случайной*. Случайную погрешность можно оценить с помощью вероятностно-статистических методов (т.е. методов математической статистики и теории вероятности). Случайная погрешность, подобно любой случайной величине, может быть полностью описана с вероятностной точки зрения, если будет известен закон распределения вероятностей, т.е. указано, какова вероятность появления тех или иных значений случайной величины.

*Промах* – погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, который для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

Такую погрешность иногда называют *грубой погрешностью* измерения, а соответствующий результат наблюдения исключают из полученного ряда результатов измерений. Источником появления такого результата измерений может служить, например, резкий скачок напряжения, ошибка наблюдателя и т.д.

*Правильность и достоверность* измерений характеризует их качество. *Правильность* измерений отражает близость к нулю систематических погрешностей результатов, а *достоверность* характеризует доверие к результатам измерений, т.е. наличие вероятностных характеристик их отклонений от истинных значений соответствующих величин.

### 3.4. Средства измерений и их классификация

Рассмотрим средства измерения и их классификацию.

*Средство измерения (СИ)* – это техническое средство, предназначенное для измерений, вырабатывающее сигнал (пока-

зание), несущее информацию о значении измеряемой величины, или воспроизводящее величину заданного (известного) размера в течение известного интервала времени [21, 35]. СИ – это меры, компараторы, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные системы.

Для средств измерений должны быть установлены *нормируемые метрологические характеристики (НМХ)*.

*НМХ* – это совокупность метрологических характеристик данного типа СИ, устанавливаемых нормативными документами на средства измерений.

*Метрологические характеристики (МХ) СИ* – это характеристики средств измерений, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений. Они предназначены для оценки технического уровня и качества СИ, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристики инструментальной составляющей погрешности измерений.

*Тип средства измерений* – это совокупность СИ одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Основными задачами метрологии относительно СИ являются: установление НМХ, установление единой классификационной системы и методов поверки СИ.

Средства измерений подразделяются по метрологическому назначению на следующие категории:

– *рабочие средства измерений (РСИ)*, предназначенные для измерений физических величин, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений. РСИ являются самыми многочисленными и широко применяемыми. Примерами РСИ являются электросчетчик (для измерения электрической энергии), термометр (для измерения температуры) и т.д.; измерительная система на теплоэлектростанции, позволяющая получить измерительную информацию о ряде физических величин в разных точках энергоблока;

– *образцовые средства измерений* – это СИ, предназначенные для обеспечения единства измерений в стране.

В соответствии требованиями стандартизации СИ подразделяются на стандартизованные и нестандартизованные.

*Стандартизованные* средства измерений – изготовленные в соответствии с требованиями государственного и отраслевого стандарта.

*Нестандартизованные* средства измерений – уникальные средства измерений, предназначенные для специальной измерительной задачи. Нестандартизованные средства измерений не подвергаются государственным испытаниям (поверкам), а подлежат метрологическим аттестациям.

Средства измерений по степени автоматизации подразделяются на автоматические, автоматизированные и неавтоматические.

*Автоматические* средства измерений – это СИ, производящие измерения без непосредственного участия человека и все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала. Автоматические средства измерений встроены в автоматические технологические линии.

*Автоматизированные* средства измерений производят в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций.

*Неавтоматические* средства измерений не имеют устройств для автоматического выполнения измерений и обработки их результатов (жидкостной манометр, стеклянный термометр, лабораторный рН-метр и т.д.).

В зависимости от предназначения в измерительном процессе СИ подразделяются на:

- меры;
- измерительные приборы;
- измерительные преобразователи;
- измерительные устройства;
- измерительные системы.

Дадим определения указанным видам средств измерения.

*Мера* – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Мера выступает в качестве носителя единицы физической величины. Примерами мер являются нормальный элемент (мера ЭДС) с номинальным напряжением 1В; магазин сопротивлений; конденсатор переменной емкости.

*Измерительный прибор* – это средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины  $Y$  в установленном диапазоне и в форме  $N$  доступной для непосредственного восприятия человеком (оператором).

Если  $N$  – это показание в виде отсчета по шкале или записи на диаграммной бумаге, то измерительный прибор называется – *аналоговым* ( $Y$  – непрерывная величина).

Если  $N$  – показания в цифровой форме (время, температура, влажность на табло) как результат дискретного преобразования непрерывной измеряемой величины, то прибор называется *цифровым*.

По способу отсчета показаний измерительные приборы делятся на *показывающие, регистрирующие, самопишущие и печатающие*.

Если измерительный прибор снабжен счетчиком, где значение физической величины суммируется по времени, то это *интегрирующий измерительный прибор*. Примерами таких приборов могут быть, например, устанавливаемые в домах водосчетчики.

*Измерительным прибором прямого действия* называют прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения обратной связи, например, показывающий манометр, манометрический термометр.

К измерительным приборам принято относить компараторы для сравнения мер и нулевые индикаторы, например, гальванометры. При этом компаратор с набором мер является *измерительным прибором сравнения*, а гальванометр – *высокочувствительным показывающим прибором*.

*Измерительные приборы сравнения* предназначены для сравнения мер между собой и для сравнения измеряемой величины с мерами. Особенность этих измерительных приборов заключается в том, что для проведения с их помощью измерений необходимы меры. Примеры таких приборов: рычажные весы, потенциометры.

*Измерительный преобразователь* – техническое средство с НМХ, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, но не поддающейся непосредственному наблюдению человека (оператором).

В зависимости от занимаемого места в измерительной цепи преобразователи делятся на *первичные, промежуточные, масштабные и передающие*.

*Первичным преобразователем* называют измерительный преобразователь, имеющий непосредственный контакт с измеряемой величиной, т.е. это первое устройство в измерительной цепи. К ним можно отнести: термоэлектрические преобразователи (термопары), термопреобразователи сопротивления, сужающие устройства расходомеров.

Иногда первичные измерительные преобразователи называются *датчиками*. *Электрический датчик* – это один или несколько измерительных преобразователей, объединенных в единую конструкцию и служащих для преобразования измеряемой неэлектрической величины в электрическую. Например, датчик давления, датчик температуры, датчик скорости и т.д.

Измерительный преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного преобразователя, называют *промежуточным*. Примером промежуточного преобразователя является нормирующий преобразователь, предназначенный для преобразования выходного сигнала первичных преобразователей и выходного сигнала переменного тока измерительных устройств (дифференциальных манометров, манометров и других приборов) в унифицированный сигнал постоянного тока.

*Передающим* измерительным преобразователем называют измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

Для *масштабных* измерительных преобразователей характерно то, что у них сигналы на входе и выходе представляют физическую величину одного и того же вида, изменяя лишь ее размер. Примером являются измерительные трансформаторы тока или напряжения, а также измерительные усилители.

По характеру преобразования преобразователи можно разделить на *аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые и микропроцессорные измерительные преобразователи*. Если при преобразовании происходит изменение природы физической величины, то сам преобразователь называют в соответствии с видами этих физических величин, например, электромеханический, пневмомеханический, электросиловой, пневмосиловой.



*Измерительными устройствами* называют средства измерений, состоящие из измерительных приборов и измерительных преобразователей. Измерительные устройства в зависимости от их назначения и функций, могут быть разделены на первичные и промежуточные измерительные устройства (приборы). Первичные и промежуточные приборы, снабженные передающими преобразователями, могут быть выполнены с отсчетными устройствами или без них.

*Вторичными измерительными устройствами* (вторичными приборами) называют средства измерений, которые предназначены для работы в комплекте с первичными или промежуточными приборами, а также с некоторыми видами первичных и промежуточных преобразователей.

В настоящее время к средствам измерений отнесены и более сложные измерительные устройства автоматического действия – измерительные системы.

*Измерительная система* – это совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, компьютеров и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерения одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов для разных целей [1].

Измерительная система, функционирующая как единое целое и предназначенная для автоматического (или автоматизированного) получения информации о состоянии объекта, в широком понимании, предполагает машинную обработку результатов измерений с автоматическим введением поправок, регистрацию и индикацию результатов измерений, а также преобразование этих данных в выходные сигналы системы.

### 3.5. Метрологические характеристики средств измерений

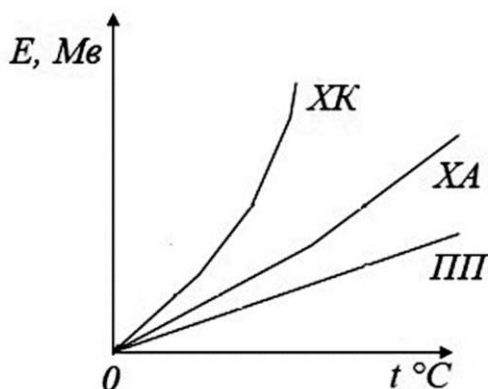
Все средства измерений обладают определенными метрологическими характеристиками (МХ).

*Метрологические характеристики* — это, по сути, «визитная карточка» средств измерений. Располагая МХ средств изме-

рений легко решить вопрос оптимального выбора комплекта СИ для получения достоверной и точной информации.

Рассмотрим основные нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

*Номинальная статическая* (или градуировочная) характеристика (НСХ) средств измерений вносится в технический паспорт измерительного прибора в виде таблицы, графика или формулы. Эта характеристика выражает функциональную связь между входной величиной  $X$  прибора и выходной  $Y$  ( $Y=f(X)$ ) величиной прибора, которая может быть, как линейной, так и нелинейной. За входную величину  $X$  принимается сигнал, поступающий на вход средства измерения, например, давление, подводимое к манометру. Выходная величина  $Y$  – это сигнал, получаемый на выходе средства измерения, например, показание манометра, отсчитываемое по шкале. В случае с термоэлектрическим преобразователем входной величиной является подводимая к нему температура, выходной – термо-ЭДС, генерируемая преобразователем. Пример номинальной статической характеристики представлен на рис. 3.1, где показаны номинальные статические характеристики для термоэлектрических преобразователей градуировок ХА (хромель-алюмель), ХК (хромель-копель) и ПП (платинородий-платина).



**Рис. 3.1. Номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей**

*Чувствительность* средства измерения – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины (входного сигнала)

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (3.4)$$

Применительно к измерительным преобразователям это отношение называют *коэффициентом преобразования* (или коэффициентом передачи). Эта характеристика связана с первой МХ. Для линейной зависимости  $Y=f(X)$  чувствительность  $S$  является постоянной (это угол наклона прямой), а для нелинейной зависимости  $Y=f(X)$  чувствительность  $S$  изменяется.

Под *порогом чувствительности* понимают наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать изменение показаний измерительного прибора или выходного сигнала преобразователя. Порог чувствительности выражают в долях абсолютного значения допускаемой основной погрешности средства измерений.

Рассмотрим далее вариацию средств измерений. Неоднозначность градуировочной характеристики при увеличении и уменьшении измеряемой (входной) величины характеризуется вариацией. *Вариацией* называется наибольшая разность между выходными сигналами средства измерения, при прямом и обратном ходе соответствующими одному и тому же значению входной величины, графически это иллюстрируется на рис. 3.2. Плавный, медленный подход к значению измеряемой величины со стороны меньших значений – прямой ход, со стороны больших значений – обратный ход. Вариация нормируется в долях основной допускаемой погрешности.

Далее рассмотрим *диапазон измерения* (или преобразования) средств измерений.

Для шкал вида  $0-N_{\max}$  (или  $0-N_{\text{нор}}$ ) диапазон измерения  $D=N_{\max}$  (или  $D=N_{\text{нор}}$ , соответственно).  $N_{\max}$  в данном случае – верхний предел измерения рассматриваемого измерительного прибора. Такие шкалы также называются односторонними.  $N_{\text{нор}}$  – это верхний предел преобразователя с нормированным токовым сигналом (5 мА или 20 мА). Для шкал с нулём посередине (т.е., шкал вида  $N_{\min}-0-N_{\max}$  или двусторонних шкал) диапазон  $D=|N_{\min}|+N_{\max}$ . Например, для напоромера с пределами

(–2 кПа; 2 кПа) диапазон  $D = |-2| + 2 = 4$  кПа. Для безнулевой шкалы вида  $N_{\min}-N_{\max}$  диапазон измерения рассчитывается по формуле  $D = N_{\max} - N_{\min}$ .

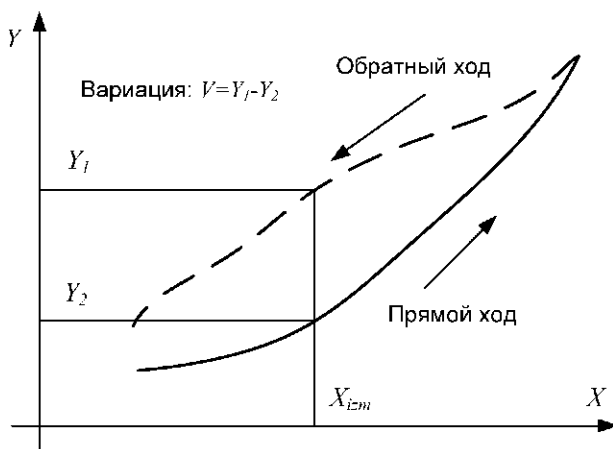


Рис. 3.2. Графическое представление вариации СИ

Важной метрологической характеристикой средства измерения является его *класс точности*.

Это нормируемая метрологическая характеристика, которая присваивается средствам измерений при их разработке с учетом результатов государственных приемных испытаний. *Класс точности* – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность [2].

*Погрешность средства измерения* – это разность между показаниями СИ и действительным значением физической величины. Основная погрешность СИ – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях. Основой для присвоения СИ класса точности является основная погрешность и форма её нормирования (смотри табл. 3.1).

Рассмотрим случай, когда форма нормирования основной погрешности СИ – *абсолютная погрешность* (т.е. погрешность СИ, выраженная в единицах измеряемой величины), и формула

расчёта предела основной допускаемой погрешности имеет вид согласно табл. 3.1 (первая строчка). В этом случае класс точности в документации обозначается или числовым значением предела основной допускаемой погрешности в единицах измеряемой величины, или формулой для расчета предела основной допускаемой погрешности. На СИ, в этом случае, класс точности обозначается буквами латинского алфавита или римскими цифрами (например: А, В, С) в зависимости от числового значения предела основной допускаемой погрешности СИ.

Если форма нормирования основной погрешности СИ – *относительная* (для случая, когда погрешность мультипликативная, т.е. погрешность линейно зависит от измеряемой величины в диапазоне измерения), то формула расчёта предела основной допускаемой погрешности имеет вид согласно табл. 3.1 (вторая строчка). Тогда класс точности в документации обозначается или числовым значением относительной погрешности, или отношением числовых значений коэффициентов  $c$  и  $d$  (смотри табл. 3.1). На СИ класс точности обозначается в первом случае числовым значением относительной погрешности, заключённым в кружок, а для второго случая обозначение класса точности остаётся таким же, как в документации.

Если форма нормирования основной погрешности – *приведённая погрешность* (для случая, когда погрешность аддитивная, т.е. погрешность не зависит от измеряемой величины в диапазоне измерения) и формула расчёта предела основной допускаемой погрешности  $\gamma_x = \Delta_x / N \cdot 100$  (согласно табл. 3.1), то класс точности в документации и на шкале СИ обозначается числовым значением приведённой погрешности. В приведённой выше формуле  $N$  – диапазон измерения для СИ, имеющих шкалу или верхнее нормирующее значение выходного сигнала преобразователя.

Перечисленные МХ нормируются для нормальных условий эксплуатации (НУ). Под *нормальными условиями* подразумевается следующее:

- температура окружающего воздуха:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ;
- влажность воздуха: 80%;
- напряжение в сети питания:  $220 \pm 10\%$ ,  $-15\%$ , В;
- частота в сети питания:  $50 \pm 0,2$  Гц;
- отсутствие вибрации и ударов в местах установки средств измерений.

Таблица 3.1

### Примеры форм нормирования погрешностей и обозначений классов точности СИ

Форма нормирования погрешности	Формула расчета предела основной допускаемой погрешности	Пределы основной допускаемой погрешности (примеры)	Обозначение класса точности (примеры)	
			В документации	На СИ
Абсолютная	$\Delta_x = X - X_o$ $\Delta_{np} = \pm [a + b( X  - X_H)]$	$\Delta_{np} = \pm 0,2^\circ C$ $\Delta_{np} = \pm [0,3 + 0,005 t ], C$	$0,2^\circ C$ $0,3 + 0,005 t $	Λ, В
Относительная	$\delta_x = \Delta_x / X_o - 100$ $\delta_{np} = \pm [c + c(X_e / X - 1)] \cdot 100$	$\delta_x = \pm 1,5\%$ $\delta_{np} = \pm [0,3 + 0,02(X_e / X - 1)]$	$1,5$ $0,3 / 0,02$	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 30px; height: 30px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">1,5</div> $0,3/0,02$
Приведенная	$\gamma_x = \Delta_x / N \cdot 100$	$\gamma_x = \pm 2\%$	$2$	2

Если условия эксплуатации не соответствуют НУ, то под действием отклонения внешних факторов возникают дополнительные погрешности, которые оговариваются в технических условиях на СИ.

Классы точности, нормируемые в соответствии с табл. 3.1, выбираются из следующего ряда: (1; 1,5; (1,6); 2; 2,5;(3); 4; 6)  $10^n$ ;  $n=1; 0; -1; -2$  и т. д.

Рассмотренные МХ СИ являются традиционными [2]. С их помощью производится максимальная (или предельная) оценка точности СИ, так называемая оценка «сверху». Пределы основной допускаемой погрешности СИ указывают область, где может находиться истинное значение измеряемой величины, без выделения систематической (постоянной) составляющей погрешности, на которую, в случае необходимости, можно было бы ввести поправку. Указанный недостаток отсутствует, если для оценки точности СИ определить МХ, установленные в соответствии ГОСТ 8.009-84.

Данный стандарт представляет характеристику погрешности СИ в виде характеристик двух составляющих погрешности СИ – систематической  $\Delta_s$  и случайной  $\Delta$ .

*Систематическая составляющая погрешности СИ* – составляющая погрешности данного экземпляра СИ, остающаяся постоянной или меняющаяся настолько медленно, что ее изменениями за время проведения измерений можно пренебречь, или изменяющаяся по определенному закону при неизменных условиях проведения измерений.

*Случайная составляющая погрешности СИ* – это погрешность СИ, обусловленная только свойствами самого СИ, представляет собой центрированную случайную величину.

Характеристики систематической составляющей погрешности СИ выбираются из числа следующих:

- $\Delta_s$  – для конкретного экземпляра СИ;
- $M[\Delta_s]$  – математическое ожидание систематической составляющей погрешности для типа СИ;
- $\sigma[\Delta_s]$  – оценка среднего квадратического отклонения систематической составляющей погрешности для типа СИ.

Характеристики случайной составляющей погрешности СИ выбирают из числа следующих:

- $\sigma[\hat{\Delta}]$  – оценка среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности СИ для конкретного экземпляра.

- $\sigma_{\circ}[\hat{\Delta}]$  – наибольшее среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности для типа СИ.

Характеристика случайной составляющей от гистерезиса обозначается Н – вариация выходного сигнала или показаний СИ.

### **3.6. Оценка точности прямых технических измерений**

Точность результата прямого измерения при применении измерительного показывающего прибора прямого действия может быть оценена приближенной предельной погрешностью, определяемой по формуле:

$$\delta_{\Pi} = \pm(\delta + \delta_{\text{доп}} + \delta_{\text{м}}) \quad (3.5)$$

где  $\delta$  – пределы основной допускаемой погрешности измерительного прибора, % нормирующего значения измеряемой величины;

$\delta_{\text{доп}}$  – дополнительная погрешность, вызванная отклонением влияющих величин за пределы, установленные для нормальных условий;

$\delta_{\text{м}}$  – методическая погрешность, % значения измеряемой величины.

При выполнении технических измерений случайные погрешности не влияют на точность измерений и поэтому отпадает необходимость многократных измерений и вычисления среднего арифметического значения измеряемой величины, так как в пределах допускаемых погрешностей рабочих средств измерений результаты отдельных измерений будут совпадать.

### **3.7. Оценка точности прямых измерений с многократными наблюдениями**

Прямые измерения с многократными наблюдениями – это, как правило, лабораторные измерения, выполняемые в нормальных условиях с использованием образцовых средств измерений, в которых устранены известные систематические погрешности.



Наблюдения с исключенными систематическими погрешностями представляют статистический ряд случайных величин, принадлежащих нормальному распределению при числе наблюдений более 50.

Это утверждение базируется на следующих предположениях: результаты наблюдения могут принимать значения, определяемые непрерывным рядом; при большом числе наблюдений результаты одинакового значения, но разного знака встречаются одинаково часто; частота (вероятность) появления больших результатов уменьшается с увеличением их значения [5].

Известно [20, 21, 28], что случайная величина может быть полностью описана с вероятностной точки зрения, если известен или задан закон распределения вероятностей, т.е. указано, какова вероятность появления тех или иных значений случайной величины. Из этого закона можно получить все практически важные сведения о случайной величине.

*Нормальный закон распределения случайной величины* в дифференциальной форме характеризуется выражением для плотности вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.6)$$

где  $f(x)$  – плотность вероятности наблюдения,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,  $x$  – значение наблюдения, являющееся случайной величиной,  $m$  – математическое ожидание или наиболее вероятное значение наблюдения.

При статистической обработке группы результатов наблюдений используют числовые характеристики нормального закона распределения случайной величины, а именно, математическое ожидание  $m$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ , так как они достаточны для описания случайной величины.

*Математическое ожидание  $m$*  оценивается как среднее арифметическое значение по формуле:

$$m = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.7)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – значения наблюдений,  $n$  – число наблюдений.

Чем больше число наблюдений  $n$ , тем ближе  $m$  к истинному значению математического ожидания.

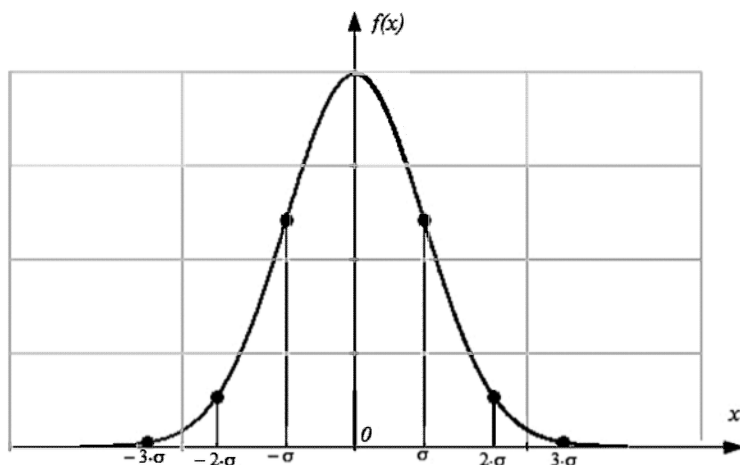
*Среднее квадратическое отклонение* определяется как положительное значение корня квадратного из дисперсии случайной величины:  $\sigma = \sqrt{D}$ . Дисперсия случайной величины характеризует степень рассеяния, разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания.

Среднее квадратическое отклонение можно определить по формуле:

$$\sigma[x] = \sqrt{D[x]} = \sqrt{\sum \frac{(x_i - m)^2}{n-1}} \quad (3.8)$$

Для оценки результата измерений при многократных наблюдениях используется доверительный интервал. *Доверительный интервал* связан с другим важным понятием — *доверительной вероятностью*. Для вычисления вероятности появления тех или иных значений случайной величины в заданном интервале необходимо проинтегрировать выражение для плотности вероятности в интересующем интервале. Другими словами, вероятность — это площадь под кривой плотности вероятности на заданном интервале. Доверительная вероятность, как и любая другая вероятность может принимать значения в интервале от 0 до 1.

На практике часто пользуются симметричными интервалами, кратными  $\sigma$ . Если взять интервал отклонений значений наблюдения  $(-\sigma, +\sigma)$ , или в абсолютных значениях наблюдений  $(m - \sigma, m + \sigma)$ , и подсчитать по таблицам [18, 20, 21, 28] интеграл вероятности, то окажется, что площадь под кривой, ограничиваемая этим интервалом (рис. 3.3), составляет около 68% всей площади. Это означает, что из всех случаев наблюдений какой-либо величины 68% полученных значений будет отклоняться от наиболее вероятного значения (математического ожидания) наблюдений не более чем на  $\pm\sigma$ . Если взять за допустимый интервал отклонения  $\pm 2\sigma$ , то в этом интервале будут находиться уже около 95% всех значений наблюдений, т.е. вероятность  $P$  нахождения результатов наблюдений в интервале  $\pm 2\sigma$  составляет 0,95. Для интервала  $\pm 3\sigma$  вероятность появления результатов наблюдений в этом интервале составляет 0,997.



**Рис. 3.3** Нормальное распределение погрешностей

Отсюда возникает понятие доверительного интервала. Доверительным называют интервал, в котором с заданной доверительной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины.

В общем случае доверительный интервал для нормального закона распределения может быть определен из выражения:

$$m_x - \varepsilon_x \leq x \leq m_x + \varepsilon_x \quad (3.9)$$

или

$$m_x - t_p \sigma_x \leq x \leq m_x + t_p \sigma_x, \quad (3.10)$$

где  $\varepsilon_x = t_p \sigma_x$  – полуширина доверительного интервала,  $t_p$  – коэффициент, определяемый по интегралу вероятностей для заданной вероятности [6].

Все рассмотренные выше выражения справедливы при  $n \rightarrow \infty$ , когда имеет место нормальный закон распределения случайной величины. Если  $n$  ограничено, но не меньше 50, то прежде чем пользоваться представленным выше математическим аппаратом, надо на основе экспериментальных данных построить гистограмму распределения случайной величины, определить  $m_x$  и  $\sigma_x$ , проверить гипотезу нормальности распределения, например, по критерию согласия  $\chi^2$  Пирсона [18, 20, 21, 28].

При малом числе наблюдений ( $n < 15$ ) имеет место закон распределения Стьюдента для случайных величин. Для определения доверительного интервала при заданной доверительной вероятности используют таблицы распределения Стьюдента, в которых устанавливается связь между числом наблюдений  $n$  и коэффициентом  $t_p$ , определяющим ширину доверительного интервала для различных доверительных вероятностей:  $t_p = f(P, n - 1)$ .

Доверительный интервал в этом случае определяется выражением:

$$\tilde{m}_x - t_p \tilde{\sigma}_x \leq x \leq \tilde{m}_x + t_p \tilde{\sigma}_x ; \quad (3.11)$$

где  $\tilde{m}_x$  и  $\tilde{\sigma}_x$  – оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) случайной величины, так как распределение Стьюдента учитывает, что при ограниченном числе наблюдений  $\tilde{\sigma}_x$  оказывается преуменьшенным по сравнению с  $\sigma_x$  при  $n \rightarrow \infty$ :  $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / \sqrt{n}$  или по результатам наблюдений:

$$\tilde{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n(n-1)}} . \quad (3.12)$$

Таким образом, оценка СКО ( $\tilde{\sigma}_x$ ) в  $\sqrt{n}$  меньше СКО ( $\sigma_x$ ) результатов наблюдений, а полуширина доверительного интервала результатов наблюдений при  $n < 15$  определяется выражением:  $\varepsilon_x = t_p$ ,

$\tilde{\sigma}_x = t_p \sigma_x / \sqrt{n}$ , где  $\sigma_x$  вычисляется согласно выражению (3.12).

Статистическую обработку группы результатов наблюдений следует выполнить по следующему алгоритму [18, 20]:

- исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений (при лабораторных измерениях этот пункт отсутствует);
- вычислить среднее арифметическое результатов наблюдений, т.е. по выражению (3.6) определить математическое ожидание  $m$ ;
- вычислить оценку СКО результатов измерений (3.12);
- вычислить доверительные границы результата измерений (3.11).

### 3.8. Оценка точности результата косвенных измерений

Оценка точности косвенно измеряемой величины  $Y$  строится на основе оценок точности аргументов  $X_i$ , входящих в математическую формулу связи  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Если аргументы  $X_i$  – результаты прямых технических измерений с оценкой точности в виде пределов основных допускаемых погрешностей средств измерений, определяемых по классам точности этих СИ, то *предельная погрешность результата косвенного измерения* оценивается следующим выражением:

$$\Delta_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}; \quad (3.13)$$

где  $\Delta x_i$ , и  $\Delta_y$  – абсолютные предельные погрешности прямых однократных измерений и результата косвенного измерения.

Аналогично производится оценка погрешности для косвенных лабораторных измерений. В этом случае аргументы  $X_i$  – результаты многократных лабораторных измерений с оценкой точности в виде среднеквадратических отклонений:  $\sigma_{x1} \dots \sigma_{xn}$ :

$$\sigma_y = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{xn}^2. \quad (3.14)$$

### 3.9. Оценка точности технических измерений, выполняемых измерительными системами

В общем виде, измерительная система может быть представлена как последовательно соединенные первичный измерительный преобразователь, линия связи (или промежуточный преобразователь) и вторичный измерительный прибор (или аналого-цифровой преобразователь перед входом в вычислительное устройство или машину). Эти вопросы рассматривались в первой главе настоящего пособия.

Существуют два метода оценки погрешностей измерительной системы. В первом методе производится оценка пределов погрешностей измерительной системы по пределам допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, входящих в систему, определяемым их классом точности, т.е. фактически производится оценка погрешности сверху, определяется максимальное значение погрешности системы. Эта *допустимая погрешность измерительной системы* оценивается как корень квадратный из суммы квадратов пределов допустимых значений погрешностей:

$$\delta_{u.c.} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}. \quad (3.15)$$

Этот способ достаточно строг, предельные погрешности  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  независимы и их значения соответствуют одинаковым доверительным вероятностям при однотипных законах распределения. В остальных случаях применения этого способа может быть некорректно.

Второй вероятностно-статистический метод оценки погрешностей достаточно сложен, но он является более строгим и корректным, позволяющим учесть особенности погрешностей отдельных средств измерения. Этот метод позволяет получить наиболее вероятное значение измеряемого параметра и оценки погрешностей, близкие к действительным значениям. Для реализации этого метода должны быть известны статистические характеристики систематической  $\Delta_c$  и случайной  $\overset{\circ}{\Delta}$ . Оценка точности измерительной системы в этом случае представляется доверительным интервалом: составляющих погрешности для типа средства измерения, т.е. для множества идентичных средств измерений.

$$\sum_{i=1}^n M(\Delta_s) - \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\Delta_s) + \sum_{i=1}^n \sigma^2(\overset{\circ}{\Delta}) + \sum_{i=1}^n \frac{H^2}{12}} < \Delta_{u.c.} <$$

$$\sum_{i=1}^n M(\Delta_s) + K \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\Delta_s) + \sum_{i=1}^n \sigma^2(\overset{\circ}{\Delta}) + \sum_{i=1}^n \frac{H^2}{12}}$$

где  $i$  – число СИ последовательно соединённых в ИС;  $K$  – коэффициент, зависящий от заданной доверительной вероятности и комбинации законов распределения плотности вероятностей случайных составляющих погрешностей (в предположении, что случайная составляющая погрешности распределена по нормальному закону, а вариация по равномерному закону распределения плотности вероятностей).

### 3.10. Метрологическое обеспечение АСУТП ТЭС

Общие вопросы метрологического обеспечения предприятий рассматривались ранее во второй главе, здесь же рассмотрим метрологическое обеспечение АСУТП ТЭС.

Метрологическое обеспечение измерительных систем включает себя следующие виды деятельности: нормирование, расчет МХ измерительных каналов ИС; метрологическая экспертиза технической документации на ИС; сертификация ИС, поверка и калибровка ИС; метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

Основной целью метрологического обеспечения является не достижение высокой точности, а гарантия единства и достоверности результатов измерений. Следует указать научные, организационные и нормативно-технические основы метрологического обеспечения измерительных систем. Научной основой метрологического обеспечения ИС является метрология. Организационной основой — государственные метрологические службы.

Нормативно-технической основой является система государственных стандартов и других нормативных и методических документов.

На теплоэнергетических объектах одной из первых задач МО является анализ состояния измерений.

Следующими не менее важными задачами является установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений. К задачам, связанным с измерениями, относятся: оценка погрешности измерений

с заданной вероятностью и разработка методик выполнения измерений. Остальные задачи связаны непосредственно с контролем и поверкой, а именно: разработка поверочных схем, ведомственная поверка СИ, метрологическая аттестация методик выполнения измерений и метрологическая экспертиза проектов АСУТП ТЭС.

В данной главе были рассмотрены основные термины и определения метрологии, необходимые для понимания изложенного далее материала, а также различных научных публикаций, инструкций и руководств. Кроме того, были изучены измерения, средства измерения, погрешности и классификации всего вышеперечисленного. Далее рассматривались метрологические характеристики средств измерений и их обозначения в инструкциях и непосредственно на средствах измерений. Последние параграфы были посвящены оценке точности результатов измерений в различных случаях и метрологическому обеспечению АСУТП теплоэнергетических предприятий. Далее изложенный в данной главе материал будет использоваться при описании методов и средств измерений различных тепловых и химических величин.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Каковы главные функции измерений?
2. Что называется измерением?
3. Что называется поверкой? Калибровкой?
4. Какие виды измерений существуют?
5. Какие существуют основные характеристики измерений?
6. Что называется средством измерения?
7. Какие средства измерений называются образцовыми?
8. Что называется измерительным преобразователем?
9. Что называется номинальной статической характеристикой?  
В каком виде она может быть представлена в паспорте прибора?
10. Что называется порогом чувствительности прибора?
11. Какие существуют виды шкал?



12. Какие существуют обозначения класса точности средства измерения?
13. В каких случаях класс точности средства измерения обозначается числом в кружочке?
14. В чем разница между относительной и приведенной погрешностью?
15. Что называется косвенным измерением?
16. Для каких целей при оценке погрешности используется нормальный закон распределения?
17. Как выполняется статистическая обработка результатов измерения с многократными наблюдениями?
18. Как оценивается точность косвенных измерений?
19. Что входит в метрологическое обеспечение АСУТП ТЭС?
20. Каковы задачи метрологического обеспечения тепло-энергетических объектов?

## Глава 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

### 4.1. Общие сведения

Температура – это самый массовый измеряемый параметр на тепловых объектах. Температура является параметром, характеризующим как качественную, так и количественную сторону процессов теплообмена и теплопереноса. Можно определить *температуру* как меру нагретости тела. Измерить температуру непосредственно, т.е. так, как измеряют длину, вес, объем или время нельзя, так как в природе не существует эталона или образца единицы этой величины. Определение температуры тела производят посредством наблюдения за изменением свойств термометрического (или рабочего) вещества, которое, будучи приведенным в соприкосновение с нагретым телом, приходит с ним через некоторое время в тепловое равновесие. Такими свойствами рабочего вещества являются: объемное расширение, изменение электрического сопротивления, термоэлектродвижущей силы, энергетической яркости излучения и ряд других. Также необходимо отметить, что температура не является аддитивным параметром (т.е., нельзя, например, измерив температуру в трех точках помещения сложить полученные значения и найти таким образом температуру в помещении).

В зависимости от свойств рабочего вещества все первичные средства измерения температуры делятся на термометры и пирометры [20, 21, 28]. Термометры реализуют контактный метод измерения, пирометры - бесконтактный.

*Контактный метод измерения* представлен следующими средствами измерения:

- стеклянные термометры (термометрическое вещество — жидкость, свойство, меняющееся от температуры — объемное расширение), диапазон измеряемых температур: от  $-200$  до  $600^{\circ}\text{C}$ ;
- термометры манометрические (термометрическое вещество - газ, жидкость, низкокипящая жидкость; свойство - изменение давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры), диапазон измеряемых температур: от  $-200$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ ;

- термоэлектрические преобразователи (основаны на зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры); диапазон измеряемых температур: от  $-200$  до  $2200^{\circ}\text{C}$ ;

- термопреобразователи сопротивления (основаны на способности различных материалов изменения электрического сопротивления с изменением температуры); диапазон измеряемых температур: от  $-270$  до  $1100^{\circ}\text{C}$ .

*Бесконтактный метод измерения* реализуют следующие средства измерений:

- квазимонохроматические (оптические) пирометры основаны на зависимости спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела от его абсолютной температуры, диапазон измеряемых температур: от  $700$  до  $6000^{\circ}\text{C}$ ;

- пирометры спектрального отношения (цветовые) основаны на использовании зависимости температуры тела от отношения спектральных энергетических яркостей для двух (или более) фиксированных длин волн, диапазон измеряемых температур: от  $300$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ ;

- пирометры полного излучения (радиационные) основаны на зависимости интегральной энергетической яркости излучения от температуры, описываемой для абсолютно черного тела законом Стефана–Больцмана; диапазон измеряемых температур: от  $-50$  до  $3300^{\circ}\text{C}$ .

Далее рассмотрим некоторые из упомянутых выше устройств для измерения температуры, например, стеклянные и манометрические термометры, термоэлектрические преобразователи, термометры сопротивления и оптические пирометры.

Единицей температуры в системе СИ является Кельвин (К), это  $1/273,15$  часть температуры тройной точки воды [21]. Температура в Кельвинах всегда только положительна, нуль по шкале Кельвина называется также абсолютным нулем. Температура по шкале Кельвина обычно обозначается  $T$ .

В быту часто применяется шкала Цельсия, температура по ней обозначается  $t$ , величины градуса Цельсия и Кельвина совпадают [21]. Для пересчета температуры из шкалы Цельсия в шкалу Кельвина и обратно можно воспользоваться соотношением  $T=t+273,15$ .

## 4.2. Стекланные термометры

Принцип действия стеклнного термометра основан на объемном расширении термометрического вещества, заключенного в нем, в зависимости от температуры [20, 21, 28]. Промышленностью выпускаются следующие термометры: технические, образцовые, повышенной точности и специальные (медицинские, метеорологические, почвенные и т.д.). По конструктивному исполнению различают палочные термометры и термометры с вложенной шкалой. Стекланные термометры обычно имеют шкалу и градуируются в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Преимущества стеклнных термометров являются простота, дешевизна и высокая точность.

Допускаемая погрешность стеклнных термометров не должна превышать деления шкалы для технических термометров, а для лабораторных и образцовых допускаемая погрешность оговаривается в технических требованиях.

В качестве недостатков стеклнных термометров можно отметить плохую видимость шкалы, невозможность передачи показаний на расстояние, неремонтнопригодность.

Стекланные термометры применяются в быту, в медицине, при лабораторных измерениях. На ТЭС стеклнные термометры используют в качестве образцовых при проведении исследований и испытаний на объекте и для контрольных измерений. При использовании их следует учесть ряд систематических погрешностей, возникающих за счет выступающего столбика термометра (т.е., за счет того, что столбик термометрического вещества выступает за пределы контролируемой среды, соответственно, имеет другую температуру) и смещения нулевой точки термометра. Систематическую погрешность за счет выступающего столбика можно рассчитать и учесть в виде поправки к результату измерения.

Для стеклнных термометров, рассчитанных для измерения при погружении до отсчитывающего значения, систематическая погрешность определяется по следующей формуле:

$$\Delta t = \gamma \cdot n(t - t_{\text{в.ст}}), \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент видимого объемного расширения термометрической жидкости в стекле,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$t$  – температура, показываемая термометром, °С;  
 $n$  – число градусов в выступающем столбике, °С;  
 $t_{в.ст}$  – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, °С.

Для технических термометров с постоянно погруженной нижней частью систематическая погрешность рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta t = \gamma \cdot n(t_{в.ст\text{град}} - t_{в.ст}), \quad (4.2)$$

где  $t_{в.ст\text{град}}$  – температура выступающего столбика при градуировке, °С (обычно  $t_{в.ст\text{град}}=20$  °С).

### 4.3. Манометрические термометры.

#### Общие положения

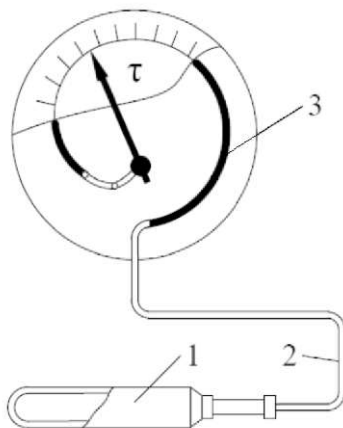
Манометрические термометры – это технические средства измерения температуры, работающие в диапазоне от –200 до 1000°С. Класс точности этих приборов выбирается из ряда: 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4.

Принцип их действия основан на зависимости давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры [20, 21, 28]. Термосистема манометрического термометра (рис. 4.1) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины 3, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный конец, соединен со стрелкой измерительного прибора.

Каждый элемент термосистемы находится в разных условиях. Термобаллон помещен в измеряемую среду. Капилляр, как линия связи чувствительного элемента с вторичным прибором, находится под воздействием внешних факторов, действующих в местах прокладки капилляра. Измерительный прибор, расположенный на гребенках манометров вблизи технологического объекта или на блочном щите управления, находится под воздействием той окружающей среды, где установлен.

Из-за такой пространственной разобщенности во время эксплуатации на показания манометрических термометров могут влиять следующие внешние факторы:

- температура окружающего воздуха в местах расположения капилляра и трубчатой манометрической пружины влияет на плотность термометрического вещества в них, что вызывает увеличение или уменьшение давления внутри термосистемы, а это приводит к появлению дополнительной температурной погрешности;



**Рис. 4.1. Термосистема манометрического термометра**

- атмосферное давление ( $P_{\text{атм}}$ ) нагружает или разгружает манометрическую трубчатую пружину и приводит к появлению дополнительной барометрической погрешности:  $\Delta P = P_{\text{внут.}} - P_{\text{атм}}$ ;

- разность высот расположения термобаллона и трубчатой манометрической пружины, находящейся в корпусе измерительного прибора, ведет к появлению гидростатической погрешности.

Манометрические термометры в зависимости от вида термометрического вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные.

Однако цепочка преобразований едина для всех типов манометрических термометров и имеет вид:

$$t \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta V_{\text{терм}} \rightarrow \Delta P \rightarrow h \rightarrow N_{\text{пр.}},$$

где:  $t \text{ } ^\circ\text{C}$  – измеряемая температура;

$\Delta V_{\text{терм}}$  – изменение объема термометрического вещества в термосистеме;

$\Delta P$  – изменение давления в термосистеме;

$h$  – перемещение запаянного конца манометрической трубчатой пружины, как следствие ее деформации при изменении давления в термосистеме;

$N_{пр}$  – показания измерительного прибора.

Ниже рассмотрим газовые, жидкостные и конденсационные манометрические термометры.

#### 4.4. Газовые манометрические термометры

Для газовых манометрических термометров область измеряемых температур составляет от  $-200$  до  $+600$  °С. Термометрическое вещество в данном случае, как правило, азот, а для минусовых температур – водород или гелий. Шкала вторичного прибора для газового манометрического термометра линейная и равномерная. Термосистема находится под начальным избыточным давлением, и чем меньше диапазон измерения, тем выше начальное давление. Это позволяет исключить дополнительную барометрическую погрешность.

Измерения сопровождаются температурной погрешностью. Для уменьшения дополнительной температурной погрешности можно увеличить объем термобаллона по сравнению с суммарным объемом капилляра и манометрической трубчатой пружины. Однако имеются ограничения на длину термобаллона (до 400 мм), и на его диаметр (от 5 до 30 мм). Можно, для этой же цели применить термокомпенсатор, выполненный из биметаллической пластины, который устанавливается внутри прибора.

#### 4.5. Жидкостные манометрические термометры

Для жидкостных манометрических термометров область измеряемых температур составляет от  $-150$  до  $+300$ °С. Термометрическое вещество, заполняющее термосистему – это ртуть, пропиловый спирт, метаксилол и другие жидкости [20, 21, 28]. Рабо-

чее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо.

В жидкостных манометрических термометрах погрешность, вызванная изменением барометрического давления, как правило, незначительна, так как давление в системе значительно. Погрешность, вызываемая изменением температуры окружающей среды, имеет место, и для ее уменьшения применяют те же способы, что и в газовых манометрических термометрах: уменьшают относительный объем жидкости, находящейся при температуре окружающей среды (уменьшая внутренний объем термокапилляра и пружины) или внутрь измерительного прибора встраивают специальные термокомпенсаторы.

В жидкостных манометрических термометрах может иметь место гидростатическая погрешность, возникающая при различных уровнях расположения термобаллона и измерительного прибора. Для снижения возможных гидростатических погрешностей длину капилляра уменьшают до 10 м. Допускаемые расстояния по высоте между термобаллоном и измерительным прибором указываются в инструкциях к приборам.

#### **4.6. Конденсационные манометрические термометры**

Для конденсационных манометрических термометров область измеряемых температур составляет от  $-50$  до  $+300$  °С. Термобаллон термометра примерно на три четверти заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар [20,21,28]. В качестве рабочей жидкости применяются фреон – 22, пропилен, хлористый метил, ацетон и этилбензол. Капилляр и манометрическая пружина заполняются, как правило, другой жидкостью с температурой кипения большей, чем у рабочей жидкости. Однозначная зависимость давления насыщения паров от температуры имеет место только до определенной температуры, называемой критической, и имеет нелинейный вид.



В связи с тем, что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, на показания термометра не будет оказывать влияние температура окружающего воздуха. Гидростатическая погрешность вызывается разностью высот расположения термобаллона и измерительного прибора, причем эта погрешность будет зависеть от показаний прибора: в начале шкалы она будет больше, а в конце – меньше. Длина капилляра для уменьшения этой погрешности не должна превышать 25 м.

Барометрическая погрешность у этих приборов может иметь место на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. В остальных случаях влияние давления будет пренебрежимо мало.

Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью дистанционной передачи показаний и автоматической их записи. К недостаткам относится трудность ремонта при разгерметизации системы, ограниченное расстояние дистанционной передачи показаний и во многих случаях большие размеры термобаллона.

Газовые и жидкостные манометрические термометры имеют класс точности 1; 1,5; и 2,5, конденсационные – 1,5; 2,5 и 4. 3.4.

## **4.7. Измерение температур термоэлектрическими термометрами**

В тепловой и атомной энергетике, а также в других отраслях широко применяются термоэлектрические термометры. Их полезной чертой является возможность дистанционной передачи показаний, которая отсутствует у стеклянных термометров, а у манометрических термометров присутствует ограниченно.

Измерение температур термоэлектрическими термометрами – это процесс, осуществляемый комплектом последовательно соединенных технических средств. Эти комплекты могут отличаться количеством технических средств и их типами при наличии одного и того же датчика – термоэлектрического преобразователя.

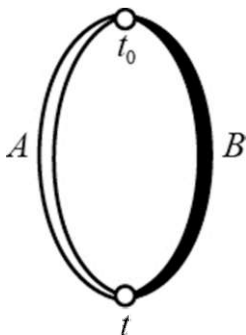
Применение термоэлектрического преобразователя (ТЭП) для измерения температуры основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары (ТЭП) от температуры [20, 21, 28].

ТЭП – первичный измерительный преобразователь, преобразующий температуру в термо-ЭДС. Он устанавливается непо-

средственно на объекте (по месту). Область измеряемых температур от  $-200$  до  $2200^{\circ}\text{C}$ ; при кратковременном измерении – до  $2500^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.7.1. Основы теории ТЭП

В основе теории ТЭП лежит явление термоэлектричества, открытого в XVIII в. Суть явления заключается в том, что в замкнутом контуре, состоящем из двух разнородных металлических проводников  $A$  и  $B$  (рис. 4.2) непрерывно течет ток (термоток), если места спаев имеют разные температуры  $t$  и  $t_0$ . Соединенные таким образом два разнородных металлических проводника называются термопарой.



**Рис. 4.2.** Замкнутый контур из двух разнородных металлических проводников  $A$  и  $B$

Современная физика объясняет термоэлектрические явления, возникающие в термопаре, следующим образом [20, 21, 28].

С одной стороны, вследствие различия уровней Ферми у различных металлов при их соприкосновении возникает контактная разность потенциалов – ЭДС, зависящая от температуры спаивания (эффект Зеебека).

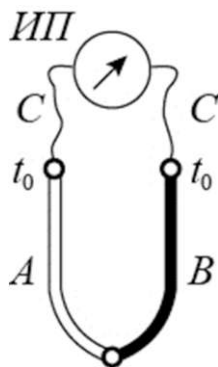
С другой стороны, концентрация свободных электронов в металле зависит от температуры. При наличии разности температур между концами однородного проводника в результате диффузии электронов, возникает разность потенциалов, зависящая от разности температур концов (явление, открытое Томпсоном).

Таким образом, термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) складывается из суммы скачков потенциала в контактах (спаеях) термопары и суммы изменений потенциала, вызванных диффузией электронов, и зависит от материала проводников и их температур  $t$  и  $t_0$  и обозначается символом  $E(t, t_0)$ .

Отсюда, для однородных по длине проводников (рис. 4.3):

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (4.3)$$

Это основное уравнение термопары. Для однородных проводников термоЭДС зависит только от материала проводников и температур спаев и не зависит от градиента температур по длине проводника. Если  $t=t_0$ , то  $E_{AB}=0$ . Для измерения термоЭДС в цепь термопары включают измерительный прибор с помощью третьего проводника. Существует два способа включения измерительного прибора: в разрыв холодного спаея (рис. 4.3); в разрыв электрода (рис. 4.4).



**Рис. 4.3. Включение измерительного прибора в разрыв холодного спаея**

Чтобы измерить термоЭДС, разрываем холодный спаея и подсоединяем с помощью нового проводника (С) измерительный прибор.

Если  $t_0=t$ , то  $E_{ABC} = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$ .

Отсюда  $e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$ .

Если  $t \neq t_0$ , то  $E_{ABC} = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$ , или, учитывая выражение выше,  $E_{ABC} = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}$ , т.е. если температуры мест подсоединения третьего проводника  $C$  равны между собой, то включение измерительного прибора не искажает термоЭДС термопары.

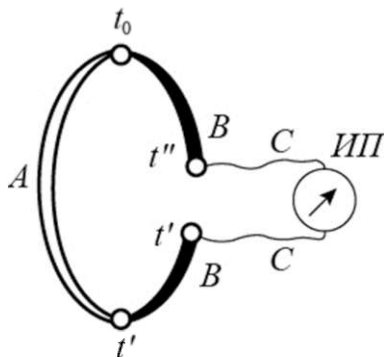


Рис. 4.4. Включение измерительного прибора в разрыв электрода

Для измерения термоЭДС разрываем один из электродов и с помощью нового проводника –  $C$  подсоединяем измерительный прибор.

$$E_{ABC} = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_2) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0), \quad (4.4)$$

$$E_{AB} = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0). \quad (4.5)$$

При вычитании из (4.4) выражения (4.5), получим:  $\Delta E = e_{BC}(t_2) + e_{CB}(t_1)$ , если  $t_2 = t_1$ , то  $\Delta E = 0$ , т.е. если температуры мест подсоединения третьего проводника ( $C$ ) равны между собой, то включение измерительного прибора не искажает термоЭДС термопары.

Результаты выше представленных доказательств составляют суть «теоремы о третьем проводнике»: включение в цепь термопары третьего проводника « $C$ » из любого материала не вызывает искажения термоЭДС, если температуры мест подсоединения этого проводника одинаковы [20, 21, 28].

Для решения отдельных задач измерений температуры применяются различные способы соединения термопар. Наиболее распространенные из них – термобатарея (рис. 4.5) и дифференциальная термопара (рис. 4.6).

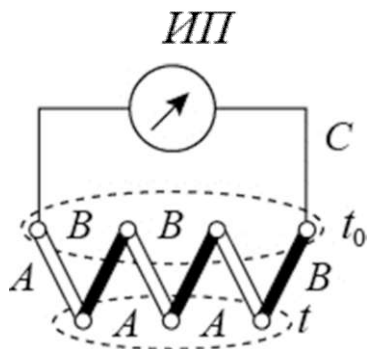


Рис. 4.5. Термобатарея

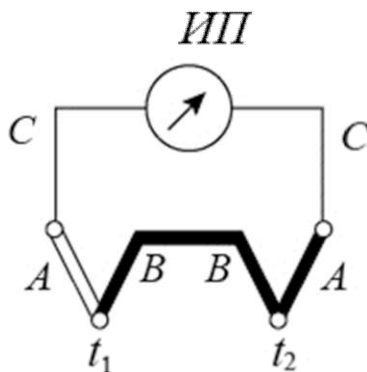


Рис. 4.6. Дифференциальная термопара

*Термобатарея* – это последовательно включенные однотипные термопары, рабочие концы которых имеют измеряемую температуру  $t$ , а свободные  $t_0$ .

Такое включение применяют для измерений при малых разностях температур рабочего  $t$  и свободного  $t_0$  концов. При этом термоЭДС, развиваемая  $n$  термопарами, суммируется, т.е.  $E_{\text{терб}} = nE_{\text{АВ}}$ . Термобатарея, увеличивая термоЭДС, позволяет уменьшить погрешность её измерения, но при этом не повышает существенно точность измерения температуры.

*Дифференциальная термопара* – это две однотипные термопары, но включенные встречно. При этом рабочий спай одной из термопар располагают в точке с температурой  $t_1$ , а второй – с температурой  $t_2$  [20,21,28].

Такое включение применяют для измерения разности температур в двух точках. При этом  $E_{\text{диф}}(t_1, t_2) = e(t_1) - e(t_2)$ . Места подсоединения термопар к измерительному прибору будут являться свободными концами и должны иметь постоянную температуру  $t_0$ .

#### 4.7.2. Стандартные ТЭП

*Стандартные ТЭП* – это такие средства измерения, которые выпускаются промышленностью в соответствии с ГОСТ Р 50431 – 92 и имеют стандартную градуировочную характеристику, полученную при  $t_0 = 0$  [20, 21, 28], которой присвоено название *номинальная статическая характеристика преобразования* (НСХ). НСХ задается в виде таблиц или формул и обозначается условным символом (например, НСХ ХА; НСХ ХК и т.д.).

ТЭП можно изготовить из двух любых разнородных сплавов (проводников, например, хромель-копель ХК, хромель-алюмель ХА, платинородий-платина ПП), но главные требования к термоэлектродным материалам для изготовления стандартных ТЭП следующие:

- стабильность градуировочной характеристики;
- воспроизводимость свойств термоэлектродных материалов во времени.

Стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики материалов обуславливают точность измерения температуры и возможность изготовления взаимозаменяемых ТЭП.

Уравнение стандартной ТЭП можно представить в виде:

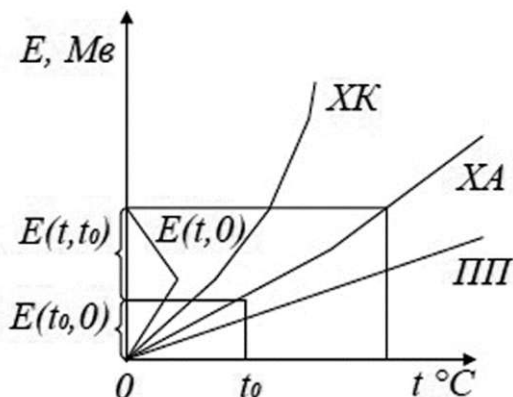
$$E(t, t_0) - E(t, 0) - E(t_0, 0), \quad (4.6)$$

где  $E(t, t_0)$  – термоЭДС, измеряемая на клеммах головки стандартной ТЭП;  $E(t_0, 0)$  – термоЭДС стандартной ТЭП при температуре рабочего конца  $t_0$  и температур свободных концов  $0$  °С;  $E(t, 0)$  – термоЭДС стандартной ТЭП, соответствующая измеряемой температуре  $t$  °С.

Из уравнения (4.6) можно определить  $E(t, 0)$ :

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0). \quad (4.7)$$

В основе измерения температуры стандартными ТЭП лежит уравнение (4.7). Графическая интерпретация уравнения (4.7) представлена на рис. 4.7.



**Рис. 4.7. Графическое представление уравнения стандартной термопары**

Техническая реализация этого уравнения сводится к различным методам измерения ЭДС  $E(t, t_0)$  и способам введения поправки на температуру свободных концов  $E(t_0, 0)$ . Сочетание метода измерения термоЭДС и способа введения поправки образуют широкий спектр комплектов измерения температур с помощью стандартных ТЭП. Эти измерительные комплекты называются термоэлектрическими термометрами [20, 21, 28].

Из уравнения (4.7) следует, что если  $t_0=0$ , то измеряемая  $E(t, t_0)$  равна  $E(t, 0)$ . Такое положение позволяет представить термоэлектрический термометр одним техническим средством, измеряющим  $E(t, 0)$  с дальнейшим переводом термоЭДС по НСХ в значение измеряемой температуры в °C. Однако, это идеальный случай и в технических измерениях встречается крайне редко.

Учет поправки на  $E(t_0, 0)$  – это та реальность, о которой необходимо помнить при измерении температуры стандартными ТЭП.

Значение поправки зависит от правильности определения значения  $t_0$ , связанного с реальными условиями установки ТЭП на объекте. Реальные условия будут зависеть от режима установки,

температуры окружающего воздуха и других факторов. Отсюда возникает необходимость в удлиняющих термоэлектродных проводах, которые позволят отвести свободные концы в такое место, где будет расположен автоматический компенсатор, содержащий термочувствительный элемент, температура которого равна  $t_0$ .

#### **4.7.3. Удлиняющие термоэлектродные провода**

Упомянутые выше удлиняющие термоэлектродные провода (ТЭ-провода) должны быть термоидентичными удлиняемым термоэлектродам, чтобы исключить возникновение паразитной термоЭДС.

К к ТЭ-проводам предъявляются следующие требования:

– удлиняющие ТЭ-провода должны иметь ту же градуировочную характеристику в интервале температур от 0 до 100°C, что и сам ТЭП, т.е. каждый термоэлектрод должен удлиняться своим ТЭ-проводом

– места соединения ТЭ-проводов с термоэлектродами ТЭП должны иметь одинаковую температуру (согласно «теореме о третьем проводнике»).

Таким образом, подключение к ТЭП удлиняющих проводов аналогично удлинению термоэлектродов, т.е. концы ТЭ-проводов становятся свободными концами, и их температура определяет действующую  $E(t_0, 0)$ , на которую необходимо вводить поправку [20, 21, 28].

#### **4.7.4. Способы введения поправки на $E(t_0, 0)$**

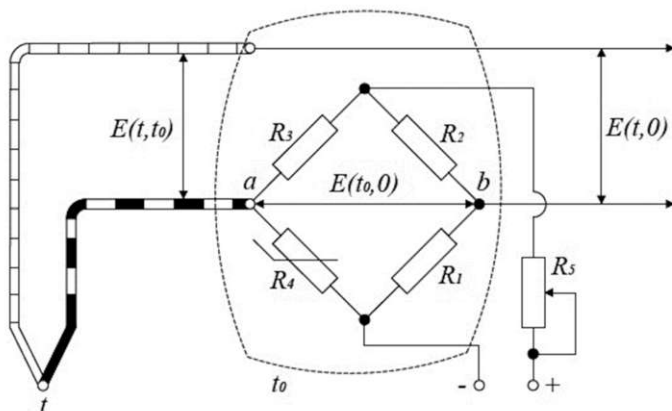
ЭДС  $E(t_0, 0)$  является систематической погрешностью, сопровождающей метод измерения температуры стандартными ТЭП. Рассмотрим некоторые положения, касающиеся введения поправки на температуру свободных концов.

Простейшим способом введения поправки является расчетный. Значение поправки  $E(t_0, 0)$  определяется по НСХ ТЭП для известного или измеренного значения  $t_0$ . Прибавив это значение, к измеренной термоЭДС  $E(t, t_0)$ , определяем  $E(t, 0)$  согласно выражению (4.7). Далее по НСХ ТЭП определяем значение измеряемой температуры  $t$  в °C. При постоянстве температуры свободных концов ТЭП  $t_0$  в течение определённого интервала времени, воз-



можно, введение поправки путем смещения нулевой отметки измерительного прибора – милливольтметра на  $E(t_0, 0)$ , если шкала в мВ и на значение  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ , если шкала в  $^{\circ}\text{C}$  (пирометрический милливольтметр).

Значение поправки  $E(t_0, 0)$  можно создать в диагонали неуравновешенного моста, включенного в цепь ТЭП (рис.4.8), как в качестве отдельного средства, так и встроенного в измерительный прибор или преобразователь.



**Рис. 4.8. Измерение термо-ЭДС с устройством для автоматического введения поправки на температуру свободных концов**

Изменение напряжения в диагонали:  $a-b-U_{ab}=E(t_0, 0)$  достигается за счет включения в одно из плеч моста медного резистора  $R_4$ , имеющего температуру свободных концов ТЭП -  $t_0$ ,  $^{\circ}\text{C}$ . Резисторы  $R_1=R_2=R_3$  выполнены из манганина,  $U_{cd}$  – напряжение в диагонали питания неуравновешенного моста. Резистор  $R_5$ : предназначен для изменения напряжения питания моста при изменении НСХ ТЭП. При изменении  $t_0$  до  $t_0^1$  при  $t = \text{const}$  изменяется  $R_4$ , а, следовательно,  $U_{ab}$  до значения  $E(t_0^1, 0)$ . При этом выходное напряжение равно термоЭДС  $E(t, 0)$  остается неизменным, так как входная термоЭДС  $E(t, t_0)$  алгебраически суммируется с  $U_{ab}$ . Такой способ введения поправки называется мостовым.

Введение поправки на  $E(t_0, 0)$  возможно произвести (рис. 4.9) путем создания падения напряжения на медном резисторе  $R_m$  от  $U_{ct}$  в контуре, включенном в цепь измерительного прибора (ПП – 160) [20, 21, 28].

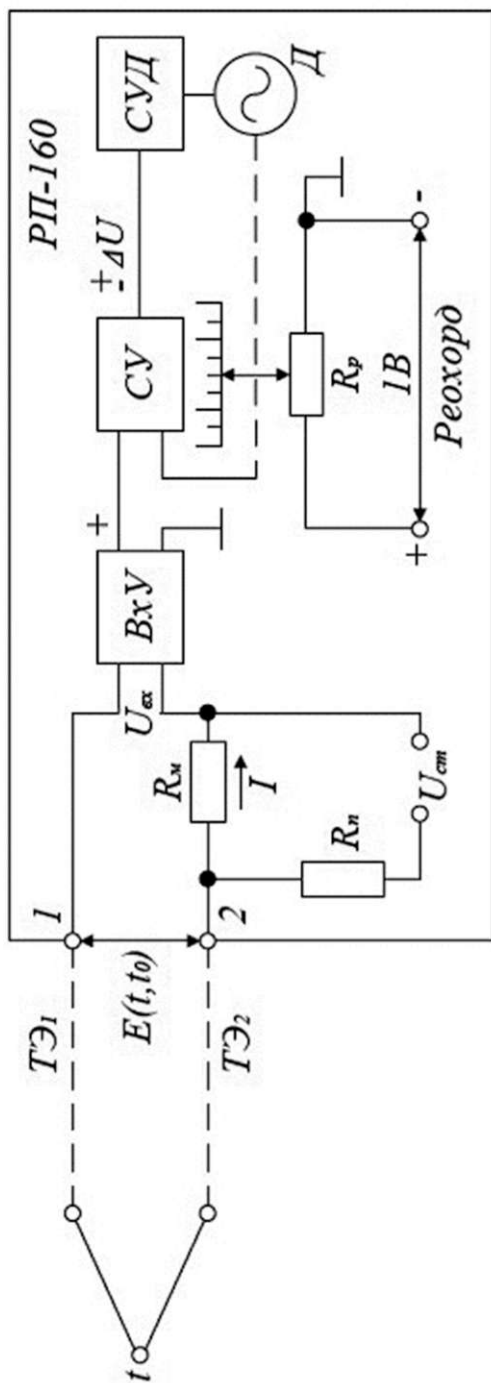


Рис. 4.9. Схема прибора РП-160 для измерения термо-ЭДС

В автоматизированных системах управления тепловыми процессами в качестве компенсирующих устройств, применяются соединительные коробки: КС-345, КС 313, УК 82-0 [20, 21, 28]. Для введения поправки в них используются платиновые термометры сопротивления, расположенные внутри коробки рядом со свободными концами ТЭП. Сигналы от соединительных коробок заводятся в вычислительные устройства (ВУ) для обработки и дальнейшего использования уже исправленной достоверной информации.

Способ введения поправки на  $t_0$  в автоматических потенциометрах отличается от рассматриваемых выше тем, что измерительная система в потенциометрах реализует измерение не  $E(t,0)$ , а  $E(t, t_0)$  и поправка  $E(t_0,0)$  согласно (4.6) уменьшает компенсирующее напряжение в измерительном приборе при увеличении температуры  $t_0$ , оставляя часть компенсирующего напряжения, приходящегося на  $E(t,0)$ , постоянным. Подробно вопрос поправки на температуру свободных концов ТЭП рассмотрен ниже в разделе «Средства измерения и преобразования термоЭДС».

В современных интеллектуальных микропроцессорных средствах для измерения температуры вопрос введения поправки на  $E(t_0,0)$  решается расчетно-программным способом по следующей схеме, согласно (4.7):

- на вход микропроцессорного средства от ТЭП поступает термоЭДС  $E(t,t_0)$ ;

- температура свободных концов  $t_0$  измеряется терморезистором  $R_t$  (медным или платиновым), расположенным у клемм подсоединения ТЭП;

- по измеренному значению  $R_t$  в микропроцессоре (МП) рассчитывается значение  $t_0$  и выводится по требованию на дисплей прибора;

- по рассчитанному значению  $t_0$  в МП определяют  $E(t_0,0)$  по НСХ ТЭП и это значение суммируется с  $E(t,t_0)$ ;

- по  $E(t,t_0)$  в МП определяют  $t$  по НСХ ТЭП и значение выводится на дисплей прибора.

#### ***4.7.5. Средства измерения и преобразования термоЭДС ТЭП***

Средства для измерения и преобразования термоЭДС при измерении температуры реализуют прямой, компенсационный или расчетно-программный методы.

Рассмотрим прямой метод измерения термоЭДС, при котором ЭДС измеряется с помощью милливольтметра, схема приведена на рис. 4.10.

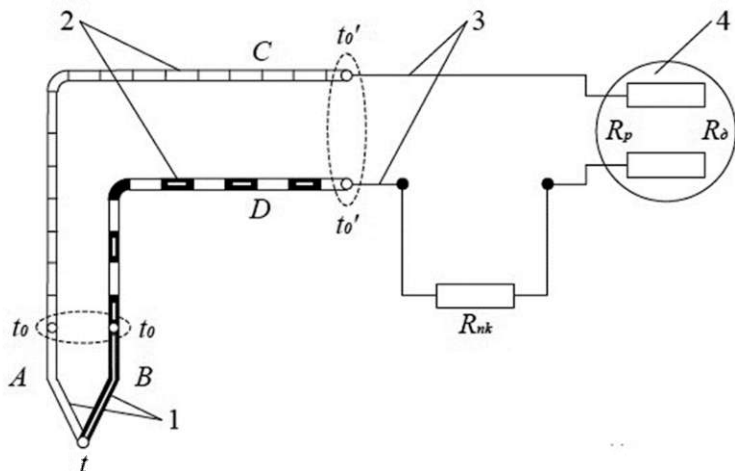


Рис. 4.10. Прямой метод измерения термоЭДС

На рисунке 4.10 введены следующие обозначения:  $A$  и  $B$  – термоэлектроды ТЭП (1);  $C$  и  $D$  – удлиняющие термоэлектродные провода (2); соединительные провода (3); милливольтметр (4);  $t$  – температура горячего спая (измеряемая температура);  $t_0$  – температура свободных концов ТЭП (головки термопары);  $t_0^1$  – температура в месте установки милливольтметра;  $R_{нк}$  – сопротивление подгоночной катушки,  $R_{mv}$  – сопротивление милливольтметра ( $R_p + R_d$ ).

ТермоЭДС ТЭП однозначно зависит от температуры рабочего спая, если температура свободных концов постоянна. Милливольтметр — это прибор магнитоэлектрической системы. Принцип действия милливольтметров основан на взаимодействии тока  $I$ , протекающего через подвижную рамку прибора, с полем постоянного магнита [20,21,28].

Показания милливольтметра определяются формулой:

$$\varphi = S \cdot I = S \cdot E(t, t_0^1) / (R_{mv} + R_m + R_{cn} + R_{нк}), \quad (4.8)$$

где  $E(t, t_0^1)$  – термоЭДС ТЭП при температурах рабочего конца  $t$  и свободного конца  $t_0^1$ ;  $R_{\text{сн}}$  – сопротивление соединительных и удлиняющих проводов;  $R_r$  – сопротивление термометра.

Для того чтобы  $\varphi$  (показания прибора) однозначно зависели от измеряемой термоЭДС, необходимо постоянство знаменателя, т.е. суммы указанных сопротивлений.

Знаменатель представляет сумму  $R_{\text{вн}} + R_{\text{мв}}$ , где  $R_{\text{вн}}$  – внешнее сопротивление, равное сумме  $(R_r + R_{\text{сн}} + R_{\text{ик}})$  – это сопротивление, которое указывается на шкале милливольтметра, и является градуировочным (выбирается из ряда: 0.6; 5; 15 Ом). Оно может изменяться под воздействием внешних влияющих факторов, и поэтому  $R_{\text{вн}} < R_{\text{мв}}$ . Именно за счет  $R_{\text{мв}}$  сопротивление всей цепи термометр – милливольтметр должно быть постоянным. Для обеспечения этого постоянства милливольтметр находится в помещении с меньшими колебаниями температуры и его сопротивление в сотни раз больше, чем сопротивление внешней цепи.

Следовательно, применяя удлиняющие термоэлектродные провода, на милливольтметр будет подана термоЭДС от температур  $t$  и  $t_0^1$ . Если в приборе предусмотрено устройство для автоматического введения поправки на  $t_0^1$  и шкала проградуирована в  $^{\circ}\text{C}$ , то он покажет измеряемую температуру. К таким средствам относится пирометрический милливольтметр Ш-4540.

В противном случае прибор покажет заниженную температуру на значение  $t_0^1$ . Если градуировочная характеристика ТЭП линейна, то для исправления результата измерения можно сместить стрелку прибора на значение  $t_0^1$  (это для технических измерений и когда априорно известно, что  $t_0^1 = \text{const}$ ) или ввести поправку на  $E(t_0^1, 0)$  расчетным путем по градуировочным таблицам для данного типа ТЭП.

Итак, измерение термоЭДС милливольтметром является прямым измерением и для получения измерения в  $^{\circ}\text{C}$  необходимо выбрать прибор на шкале которого указан тот же тип градуировки, что и ТЭП, собрать цепь с внешним сопротивлением равным указанному на шкале прибора, а значение измеряемой температу-

ры чтобы соответствовало 3/4 диапазона шкалы. При соблюдении всех указанных выше условий измерение температуры будет произведено с точностью, заданной классом точности, указанным на шкале прибора.

#### 4.7.6. Компенсационный метод измерения термоЭДС ТЭП

Компенсационный метод измерения термоЭДС основан на уравнивании измеряемой величины другой величиной, известной с высокой степенью точности (рис. 4.11) [20, 21, 28].

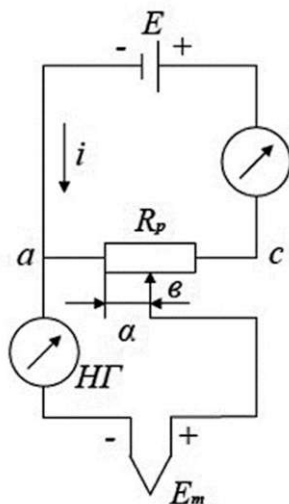


Рис. 4.11. Схема компенсационного метода измерения термоЭДС

О моменте компенсации судят по отклонению стрелки высокочувствительного гальванометра (НГ) или усилителя, выполняющего функции нуля-прибора.

$$E_T = E(t, t_0) = i \cdot R_p = U_{ab}. \quad (4.9)$$

В момент компенсации ток отсутствует в цепи ТЭП, нет падения напряжения в линии связи и, как следствие, повышается точность измерения. Именно этот факт является главным достоинством этого метода.

Погрешность измерения складывается из погрешности миллиамперметра, измеряющего ток  $i$ , точности установки части значения сопротивления  $R_p - \alpha$  и погрешности изготовления  $R_p$ .

Чтобы избежать этих недостатков для точных измерений в лабораторных условиях применяется техническое средство – потенциометр с постоянной силой тока.

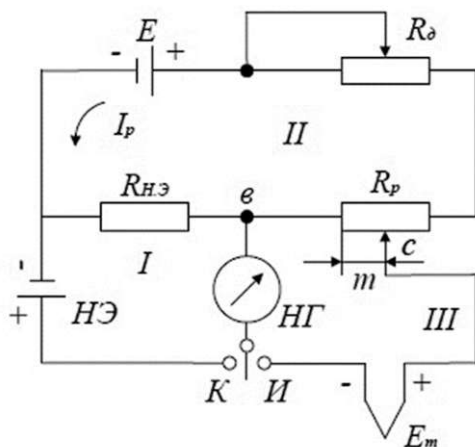


Рис. 4.12. Схема потенциометра с постоянной силой тока

Схема (рис. 4.12.) включает три контура: контур нормального элемента (I); контур рабочего тока (II); контур термопары (III). Нормальный элемент (НЭ) используется в качестве эталонного напряжения с нормированным значением ЭДС. С его помощью контролируют значение рабочего тока по падению напряжения на  $R_{н.э}$ .

Процесс измерения состоит из двух стадий.

1. Контроль значения рабочего тока  $I_p$ .

Переключатель «П» в положении «К» (контроль). Работают контуры I и II с общим участком  $R_{н.э}$ . Если  $E_{н.э} = I_p R_{н.э}$ , то стрелка нуль-гальванометра (НГ) стоит на нуле. Отсюда  $I_p = E_{н.э} / R_{н.э} = \text{const}$ . В противном случае, если  $I_p \neq 0$ , то регулируем рабочий ток  $I_p$  резистором  $R_d$  до состояния полной компенсации.

2. Измерение  $E_t$ .

Переключатель «П» в положении «И» (измерение). Работают контуры II и III с общим участком  $R_p$ . Если  $E_t = m R_p I_p$ , что соответствует  $I_t = 0$ , то при  $I_p = \text{const}$  часть значения резистора  $R_p = m$

определяет  $E_T$ . В противном случае, при  $I_T \neq 0$ , воздействуем на движок реохорда  $R_p$  и изменяя  $t$  добиваемся состояния полной компенсации.

Потенциометр с постоянной силой рабочего тока имеет высокую точность измерения, но не вводит автоматически поправку на изменение температуры свободных концов ТЭП.

#### 4.7.7. Автоматические потенциометры

Автоматические потенциометры – это технические средства для измерения температуры в широком диапазоне, которые применяются в комплекте с ТЭП. В основе измерения термоЭДС лежит компенсационный метод. Этот метод реализуется автоматически, а также автоматически вводится поправка на температуру свободных концов. Они представляют класс вторичных приборов, как показывающих, так и самопишущих и регистрирующих. Выпускаются одноточечные и многоточечные средства, с сигнализирующими устройствами и без них. Принципиальная схема автоматического потенциометра представлена на рис.4.13.

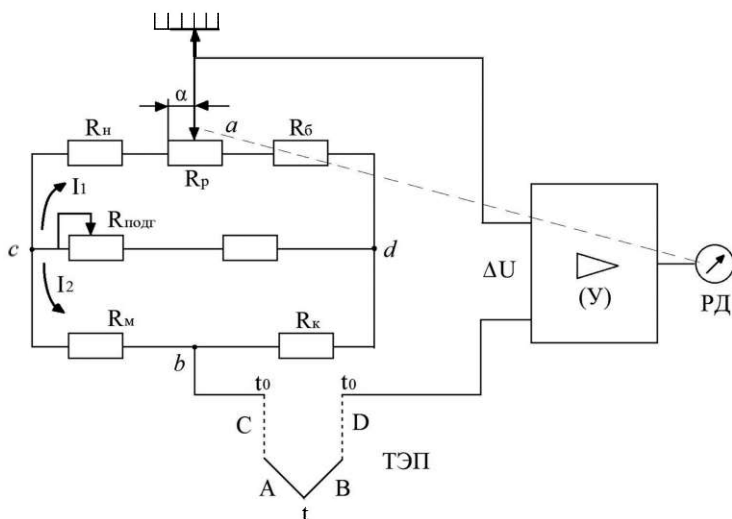


Рис. 4.13. Принципиальная схема автоматического потенциометра



На рисунке 4.13 ИПС – источник питания стабилизированный; РД – реверсивный двигатель; У – усилитель.

В автоматических потенциометрах используется компенсационная мостовая схема. Напряжение  $U_{ав}$ , компенсирующее измеряемую термоЭДС  $E(t, t_0)$  ТЭП, в этой схеме получается как разность потенциалов в двух точках. Потенциал одной из точек (а) определяется положением движка реохорда ( $R_{11}$ ), а потенциал другой (в) зависит от температуры свободных концов ТЭП ( $t_0$ ), а именно:

$$E(t, t_0) - E(t, 0) - E(t_0, 0), \quad (4.9)$$

$$U_{ав} = i_1 \cdot (\alpha \cdot R_p + R_n) - i_2 \cdot R_m. \quad (4.10)$$

Из уравнений компенсации видно, что положение движка  $\alpha$  реохорда отслеживает температуру горячего спая, т.е. измеряемую, а падение напряжения на медном резисторе  $R_m$ , отслеживает изменение температуры свободных концов ТЭП. Следует отметить, что медный резистор расположен у клемм, где находятся свободные концы ТЭП.

Пусть  $t$  возрастает, тогда  $E(t, t_0)$  тоже возрастает, при  $t_0 = \text{const}$  появляется  $\Delta U = E(t, t_0) - U_{ав}$  (в соответствии с 4.9 и 4.10). Этот сигнал подается на усилитель, где усиливается и через реверсивный двигатель, который связан с движком реохорда и со стрелкой прибора, изменяет  $\alpha$  (потенциал точки а) до момента компенсации. Так происходит процесс автоматической компенсации термоЭДС.

Для автоматического введения поправки на температуру свободных концов ТЭП предназначен резистор  $R_m$ .

Пусть  $t$  возрастает, а  $t_0$  возрастает до  $t_0^1$ , тогда  $E(t, t_0^1)$  уменьшается (4.9). Медный резистор  $R_m$ , имея температуру  $t_0^1$  увеличивает свое сопротивление на  $\Delta R_m = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t = t_0^1 - t_0$ , что приводит к уменьшению компенсирующего напряжения  $U_{ав}$  (4.10). Равенство измеряемой термоЭДС и компенсирующего напряжения  $U_{ав}$  не нарушено, т.е. стрелка прибора не смещается, и поправка на температуру свободных концов вводится автоматически. Для ТЭП с разной чувствительностью  $R_0$  различно, где  $R_0$  – начальное, расчетное значение  $R_m$  при  $t_0 = 0$ .

Изложенный компенсационный метод измерения термоЭДС положен в основу промышленных автоматических потенциометров типа КСП 1.2,3.4 (самопишущих) и КПП1,2 (показывающих), прибора РП-160. Предел допускаемой погрешности потенциометров по показаниям составляет  $\pm 0,5\%$ , по регистрации  $\pm 1\%$ .

Далее рассмотрим расчётно-программный метод измерения термоЭДС.

Программируемые, цифровые микропроцессорные вторичные приборы, получившие широкое применение в микропроцессорных системах управления, как «Квинт», «Телеперм», «Саргон» и др., в своей структуре имеют микропроцессоры (МП). МП включают постоянное запоминающее устройство ПЗУ, оперативно запоминающее устройство ОЗУ и устройство ввода и вывода данных УВВ. Наличие ПЗУ, включающее управляющие программы, исходные данные, необходимые для обработки информации, полученные результаты, позволяет производить перепрограммирование средств, делая их универсальными и производить измерение поступающих сигналов расчётно-программным методом.

Так цифровые приборы «Метран100», «Технограф 160», РМТ-49ДМ могут работать с термоэлектрическими преобразователями, термомпреобразователями сопротивления, с унифицированным сигналом по току и напряжению и сигналом взаимной индукции.

Эти приборы обеспечивают:

- индикацию измеряемой величины на цифровом табло;
- аналоговую и цифровую регистрацию измеряемого параметра на диаграммной ленте в циклическом режиме;
- преобразование входного сигнала в цифровой код для обмена по интерфейсу RS-232;
- сигнализацию о выходе измеряемой величины за пределы заданного значения;
- извлечения корня квадратного и суммирование при измерении расхода по переменному перепаду давления на сужающем устройстве.

Предел основной приведенной погрешности по показаниям и цифровой регистрации составляет  $\pm 0,25\%$ , по аналоговой регистрации и сигнализации  $\pm 0,5\%$ .

#### 4.7.8. Нормирующие преобразователи с глубокой отрицательной обратной связью

Компенсационный метод измерения положен в основу устройств с глубокой отрицательной связью (рис. 4.14).

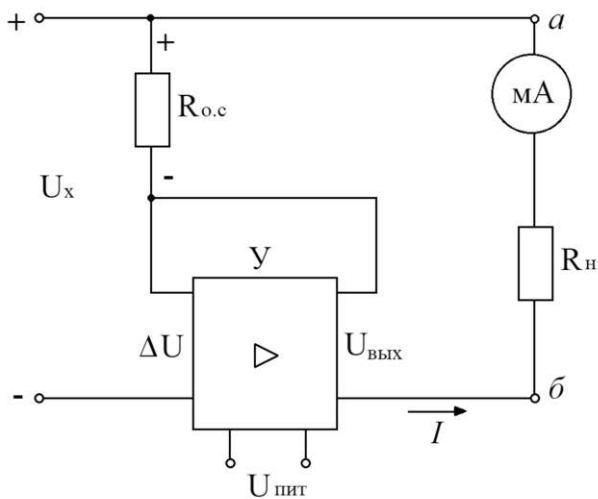


Рис. 4.14. Схема преобразователя  
с глубокой отрицательной обратной связью

К таким устройствам относятся нормирующие преобразователи, предназначенные для преобразования естественного сигнала от первичных измерительных преобразователей, при измерении температуры, к которым относятся ТЭП, в нормированный токовый сигнал 0 – 5; 0–20; 4 – 20мА и унифицированный сигнал по напряжению 0 – 10В.

В преобразователях с глубокими отрицательными обратными связями (рис. 4.14) измеряемый сигнал  $U_x$ , является задающим. Изменение  $U_x$  отслеживается напряжением обратной связи  $U_{oc}$  и их разность  $\Delta U = U_x - U_{oc}$  поступает на вход усилителя, изменяя выходной сигнал  $I$  до величины, при которой сигнал обратной связи  $U_{oc} = R_{oc}I$  практически компенсирует изменение  $U_x$ . В рассматриваемых схемах компенсирующее напряжение  $U_{oc}$  изменяется только за счет изменения выходного токового сигнала  $I$ , поскольку  $R_{oc}$  является постоянной величиной.

Рассматриваемое преобразование может осуществляться в отдельном приборе – нормирующем преобразователе, либо в устройстве унификации, расположенном непосредственно в головке термопреобразователя. Такие термопреобразователи называются термопреобразователями с унифицированным выходным сигналом и в их обозначении обычно присутствует буква У, например ТСМУ, ТХАУ [7].

#### **4.8. Измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления**

Измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления (ТПС) является контактным методом измерения. Для реализации этого метода используется комплект, состоящий из первичного измерительного преобразователя ТПС, линии связи и вторичного прибора. Область измеряемых температур от  $-270$  до  $1100^{\circ}\text{C}$  [20, 21, 28].

ТПС – это первичный измерительный преобразователь, который имеет непосредственный контакт с измеряемой средой и изготовлен из различных материалов (в первую очередь металлов), которые обладают способностью изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Вторичные приборы предназначены для измерения электрического сопротивления и градуированы в единицах измерения температуры,  $^{\circ}\text{C}$ . Линии связи – соединительные провода подсоединяют ТПС к измерительному прибору и обладают дополнительным сопротивлением, что приводит к искажению результата измерения. Для исключения или уменьшения этого влияния используют различные способы подключения ТПС к измерительному прибору.

##### ***4.8.1. Стандартные ТПС***

Стандартные ТПС – это такие первичные средства измерения, которые выпускаются промышленностью в соответствии ГОСТ Р50353 -92 и имеют стандартную градуировочную характеристику, называемую номинальной статической характеристикой преобразования (НСХ). НСХ задается в виде таблиц или формул.

Требования к материалам для изготовления стандартных ТПС.

Основные требования:

- стабильность градуировочной характеристики  $R_t=f(t)$ ;
- воспроизводимость (унификация градуировочных характеристик ТПС в пределах допусковой погрешности).

Дополнительные требования:

- высокий температурный коэффициент электрического сопротивления (для обеспечения высокой чувствительности ТПС);
- химическая инертность;
- большое удельное сопротивление;
- линейность градуировочной характеристики.

Этим требованиям отвечают следующие металлы: медь, платина, никель.

Медные ТПС нашли широкое применение в энергетике, работают в интервале температур от  $-200$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Медь – дешёвый металл, его легко получить в химически чистом виде, но главное – это линейная градуировочная характеристика.

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (4.11)$$

где  $R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ , и значение его определяет тип условного обозначения стандартной градуировки для медных ТПС, выбираемой из ряда: 10М, 50М, 100М (новые) и из старых Гр 23 (53 Ом) и Гр 24 (100 Ом).

Что касается платиновых ТПС, то чистая платина является одним из наиболее распространённых металлов. Платиновые ТПС применяются для измерения температур от  $-260$  до  $+1100^\circ\text{C}$ . Сопротивление платины имеет сложную нелинейную зависимость от температуры:

В интервале температур от 0 до  $630^\circ\text{C}$  НСХ имеет вид:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (4.12)$$

В интервале температур от  $-183$  до  $0^\circ\text{C}$  НСХ имеет вид:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)), \quad (4.13)$$

где  $R_0$  – значения сопротивления при  $0^\circ\text{C}$ , выбираются из ряда: 1, 5, 10, 50, 100 и 500 Ом, в эксплуатации находятся термометры с  $R_0 = 46$  Ом.

Условные обозначения номинальной статической характеристики преобразования (НСХ) состоит из двух элементов: П, 5П, 10П, 50П, 100П, 500 П, где цифры, соответствуют значению  $R_0$ , а буква – названию материала. Для  $R_0=46$  Ом соответствует Гр. 21 (старое обозначение).

Рассмотренные ТПС из чистых металлов с ростом температуры увеличивают электрическое сопротивление. Существуют ТПС полупроводниковые, имеющие отрицательный температурный коэффициент преобразования: т.е. с ростом температуры они уменьшают свое сопротивление. Такие ТПС нашли свое применение в схемах температурной компенсации при различных измерениях.

#### 4.8.2. Методы измерения сопротивления ТПС

Для измерения сопротивлений используются следующие методы и измерительные схемы: одно и двух мостовые схемы (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и компенсационный метод.

Рассмотрим мостовые схемы, которые положены в основу вторичных приборов.

Сначала рассмотрим неуравновешенные мосты.

Неуравновешенный мост – это измерительный мост, представленный четырьмя резисторами  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4$  (рис. 4.15).

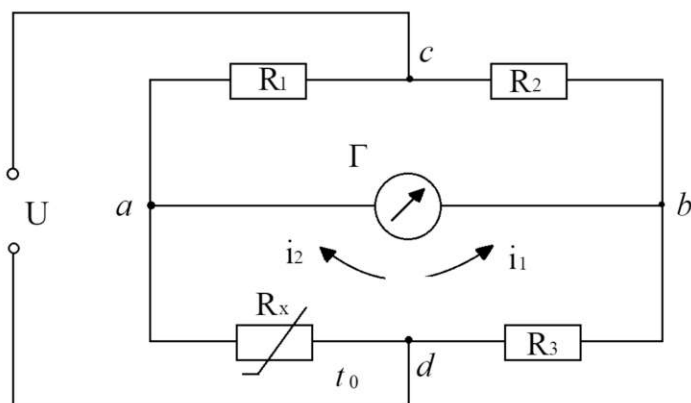


Рис. 4.15. Схема неуравновешенного моста

Источник питания включен в диагональ питания  $c-d$  и имеет напряжение  $U$ . В измерительную диагональ  $a-b$  включен измерительный прибор  $\Gamma$  (гальванометр). Сопротивления плеч моста  $R_1=R_2=R_3=\text{const}$ ,  $R_x$  – резистор, сопротивление которого неизвестно, и оно зависит от температуры. Для вывода уравнения измерения допустим, что входное сопротивление гальванометра  $R_\Gamma \rightarrow \infty$ , а  $I_{\text{ав}} \rightarrow 0$ . Тогда:

$$U_{\text{ав}} = i_2 R_x - i_1 R_3. \quad (4.14)$$

Выразим токи  $i_1$  и  $i_2$  через  $U_{\text{св}}$  с учетом принятых допущений.

$U_{cd} = i_1(R_2 + R_3)$  и  $U_{cd} = i_2(R_1 + R_x)$ , отсюда:  $i_1 = U_{cd} / (R_2 + R_3)$ ;  $i_2 = U_{cd} / (R_1 + R_x)$ .

Подставим выражения токов в уравнение (4.14) и получим:

$$U_{\text{ав}} = U_{cd}(R_x R_2 - R_1 R_3) / (R_x + R_1)(R_2 + R_3) \quad (4.15)$$

Из уравнения измерения (4.15) следует:

1) на измеряемое напряжение, которое является функцией  $R_x$ , влияет напряжение питания;

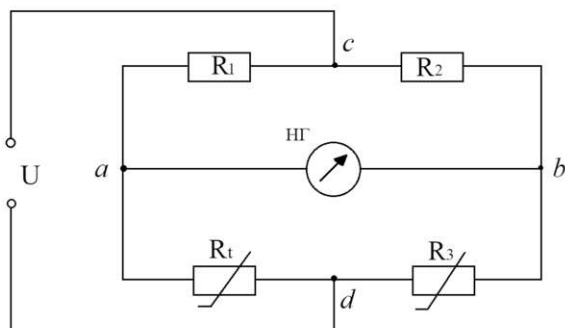
2) показания прибора ( $U_{\text{ав}}$ ) зависят от измеряемого сопротивления  $R_x$ , то есть от измеряемой температуры нелинейно, т.к.  $R_x$  входит в знаменатель.

Неуравновешенные мосты для измерения температуры с ТПС применяются редко. Однако, они нашли широкое применение для измерения сопротивления в газоанализаторах, концентратомерах и ряде других средств измерения. К преимуществам неуравновешенных мостов следует отнести простоту схемы, не требующую устройств уравнивания; возможность применения для измерения малых сопротивлений.

### 4.8.3. Уравновешенные мосты

Уравновешенный мост — это измерительный мост (рис. 4.16), где два резистора  $R_1=R_2 = \text{const}$ ,  $R_t$  – резистор, сопротивление которого неизвестно и зависит от температуры;  $R_3$  – переменный резистор, сопротивление которого может быть определено. В диагональ  $a-b$  включен нуль-гальванометр, а в диагональ  $c-d$  подается напряжение питания. Для измерения сопротивления  $R_t$  изменя-

ем  $R_3$  до момента наступления уравнивания (равновесия). Момент наступления равновесия определяется по отсутствию тока в нуль-гальванометре. Математическое условие равновесия моста представляется как  $R_1 R_2 = R_1 R_3$ , т.е. произведение сопротивлений противоположных плеч моста равны.



**Рис. 4.16.** Схема уравновешенного моста

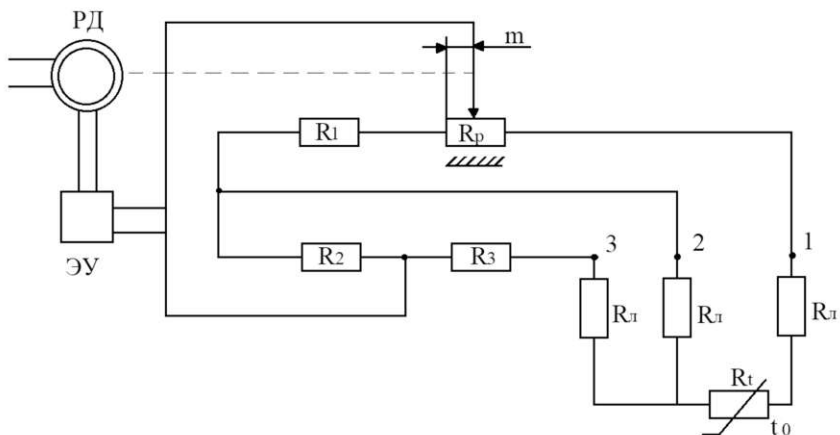
Отсюда уравнение измерения можно представить как  $R_1 = R_1 R_3 / R_2$ . Основное достоинство этого метода измерения сопротивления – это то, что напряжение питания  $U_{cd}$  не влияет на результат измерения, так как не входит в уравнение измерения.

Автоматический уравновешенный мост – это техническое средство, в котором уравнивание осуществляется изменением сопротивления плеч. Первичный преобразователь ТПС, имеющий непосредственный контакт с измеряемой средой соединительными проводами, подключен к мосту по трех проводной схеме.

На представленной схеме (рис. 4.17):  $R_1$  – сопротивление ТПС,  $R_{л1}$  – сопротивления линии связи,  $R_1, R_2, R_3$  – постоянные сопротивления плеч моста,  $R_p$  – переменное сопротивление (реохорд).

Автоматическое уравнивание осуществляется так же, как и в автоматическом потенциометре. Если потенциалы вершин моста, к которым подключается измерительная диагональ, не равны, то в ней появится напряжение  $\Delta U$ , которое усиливается электронным усилителем ЭУ. Выходной сигнал заставляет вращаться реверсивный двигатель (РД), который перемещает движок реохорда  $R_p$  до тех пор, пока не наступит равновесие моста.





**Рис. 4.17. Автоматический неуравновешенный мост**

Сопротивление  $R_p$  рассчитывается и изготавливается таким образом, что при изменении измеряемой температуры от минимального до максимального значения для уравновешивания моста движок реохорда должен переместиться от одного крайнего положения до другого. Положение движка реохорда  $m$  и связанного с ним указателя соответствует значению измеряемой температуры. Представленная схема имеет следующие преимущества:

- показания моста не зависят от напряжения питания;
- показания прибора линейно связаны с изменением измеряемого параметра;
- измерение (уравновешивание моста) осуществляется автоматически;
- трехпроводная схема включения позволяет существенно уменьшить или даже исключить погрешность показаний, вызываемую изменением сопротивления соединительных проводов. Для увеличения точности также используются четырехпроводные схемы.

#### **4.8.4. Информационно-измерительные системы измерения температуры**

Информационно-измерительные системы (ИИС) необходимы для формирования сигнала измерительной информации, поступающей или на показывающий прибор, или через устройство

связи с объектом (УСО) на модуль ПТК. Общие вопросы, относящиеся к таким системам, рассматриваются в первой главе данного пособия.

Информация по измерению температуры формируется следующим образом:

- первичными измерительными преобразователями (ТЭП, ТПС) → выходных естественных сигналы (термоЭДС или изменение сопротивления  $\Delta R$ ) → вторичные приборы аналоговые или цифровые (потенциометры типа КСП, КПП, РП-160, милливольтметр Ш-4540 или мостовые схемы типа КСМ, Ш-4540/1; интеллектуальные микропроцессорные приборы типа «Технограф», «Метран100», РМТ-49ДМ);

- первичными измерительными преобразователями (ТЭП, ТПС) → выходных естественных сигналы (термоЭДС или  $\Delta R$ ) → нормирующие преобразователи (НП) (например: Ш-9321, ИПМ-0196, НП-5-Б2, Ш-704М1, Н-02 и др.) → вторичные приборы (миллиамперметры типа КПУ, КСУ) или модули ПТК (регуляторы);

- первичными измерительными преобразователями со встроенными нормирующими преобразователями, формирующими на выходе унифицированный токовый сигнал (ТЭПУ, ТПСУ) → выходные нормированные токовые сигналы постоянного тока → модули ПТК (регуляторы);

- первичными измерительными преобразователями (ТЭП, ТПС) → выходных естественных сигналы (термоЭДС или изменение сопротивления  $\Delta R$ ) → модули ПТК.

- интеллектуальными микропроцессорными термопреобразователями → модули ПТК.

#### *4.8.5. Нормирующий преобразователь для ТЭП*

Нормирующий преобразователь предназначен для линейного преобразования термоЭДС в нормированный (или унифицированный) токовый сигнал постоянного тока от 0 до 5мА, от 0 до 20мА, или от 4 до 20мА.

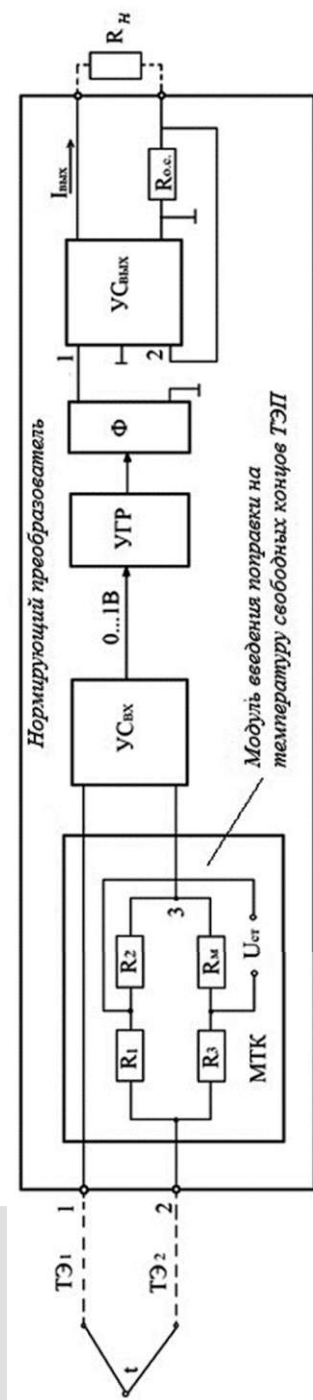


Рис. 4.18. Схема нормирующего преобразователя для ТЭП

На схеме (рис. 4.18) представлена ИИС, включающая первичный преобразователь ТЭП, линию связи, выполненную удлиняющими термоэлектродными проводами ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub>, нормирующий преобразователь НП и R<sub>н</sub> (ВП).

С помощью удлиняющих проводов ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub> свободные концы ТЭП выведены к входным зажимам 1,2 НП, где с ними рядом расположено корректирующее устройство для введения поправки на  $E(t_0,0)$ . В приведенной схеме (рис. 4.18) корректирующее устройство представлено неуравновешенным мостом МТК, где одно плечо - термочувствительный элемент – медный резистор R<sub>м</sub>, а остальные три плеча – постоянные резисторы R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, выполненные из манганина. Способ введения поправки на  $E(t_0,0)$  рассмотрен выше в параграфе 4.4. Скорректированный сигнал  $E(t,0)$  поступает на вход усилителя УС<sub>вх</sub>, предназначенного для унификации входного сигнала в выходное напряжение усилителя, которое изменяется в пределах (0...1)В, независимо от пределов измерения НП (напряжение равно нулю на нижнем пределе измерения и 1В – на верхнем). Достоверность и защиту от помех выходному напряжению с УС обеспечивают устройство гальванического разделения входных и выходных цепей УГР (для повышения помехозащищенности НП) и фильтр Ф, осуществляющий подавление помехи переменного напряжения. Дальнейшее преобразование выходного напряжения в нормированный токовый сигнал постоянного тока обеспечивается УС<sub>вых</sub>, включенным в схему с отрицательной обратной связью (подробно данная схема изложена в п.4.4). Выходной нормированный токовый сигнал постоянного тока, пропорциональный измеряемой температуре поступает на вход ВП, представленного на схеме (рис. 4.18) резистором нагрузки – R<sub>н</sub>.

#### *4.8.6. Нормирующий преобразователь для ТПС*

Нормирующий преобразователь предназначен для линейного преобразования сопротивления ТПС в нормированный токовый сигнал постоянного тока.

На схеме (рис. 4.19) представлена ИИС, включающая первичный преобразователь ТПС, линию связи, НП и ВП (R<sub>н</sub>).

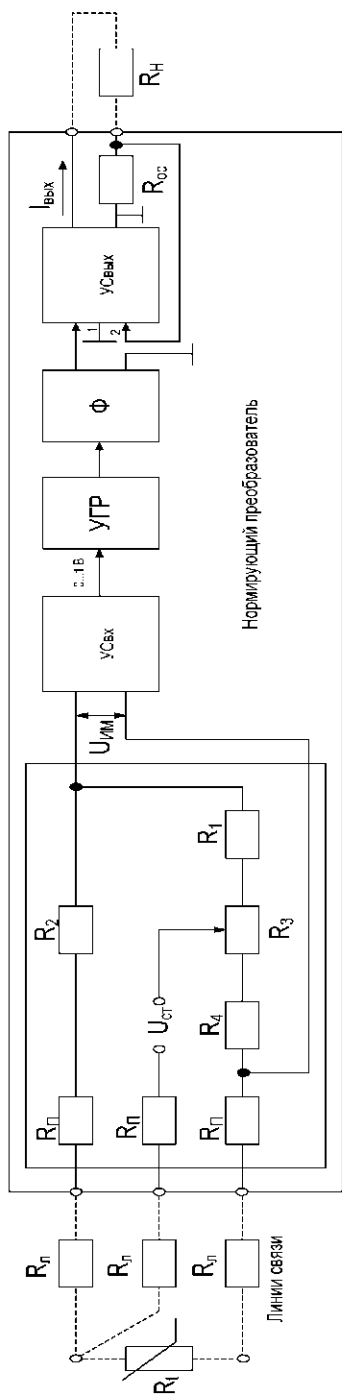


Рис. 4.19. Структурная схема нормирующего преобразователя для термометров сопротивления

Термопреобразователь сопротивления подключен к измерительному несбалансированному мосту НП по трехпроводной схеме. Питание схемы моста осуществляется от стабилизированного источника ( $U_{ст}$ ).

Выходное напряжение измерительного моста  $U_{им}$ , пропорциональное изменению сопротивления термопреобразователя  $R_t$ , при измерении температуры поступает на входной усилитель УС<sub>вк</sub> для унификации выходного напряжения с УС<sub>вк</sub> в пределах (0...1)В. Дальнейшее преобразование аналогично изложенному выше в разделе НП для ТЭП.

В современных интеллектуальных нормирующих преобразователях используются микропроцессоры. Применение микропроцессоров позволяет решить множество задач по преобразованию, защите, программированию на разные термопреобразователи (ТЭП, ТПС) и реализовать широкий спектр дополнительных сервисных функций: точная коррекция, диагностика состояния, контроль дрейфа прибора, устройство сигнализации и т. д. с обеспечением высокой точности преобразования  $\pm (0,06...0,75)^\circ\text{C}$  [20, 21, 28].

Рассмотренные схемы НП выполнены с отрицательными обратными связями, которые реализуют компенсационный метод измерения и этим повышают точность преобразователей.

## 4.9. Пирометры. Бесконтактные методы измерения температуры

Пирометры – это технические средства для измерения температуры в интервале от  $20^\circ\text{C}$  до  $6000^\circ\text{C}$ . В основе лежит метод измерения температуры тел по излучению. В отличие от термометров, имеющих непосредственный контакт с измеряемой средой, пирометры не искажают температурного поля объекта, т.к. не имеют с ним контакта, и в этом состоит их преимущество. Однако, по точности измерения температуры, они уступают контактными средствами измерения. Этот недостаток обусловлен тем, что в основе метода лежат законы излучения, открытые для абсолютно черных тел и применение их для реальных тел, сопровождается появлением методической погрешности.

Сформулируем необходимые для дальнейшего рассмотрения пирамиды понятия и термины.

- тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется *абсолютно черным телом*. Для этих тел коэффициент поглощения  $\alpha_{\lambda T}$  и коэффициент излучения  $\epsilon_{\lambda T}$  равны между собой и равны единице.

- спектральная энергетическая яркость абсолютно черного тела –  $B_{0\lambda T}$ ;

- спектральная энергетическая яркость реального тела –  $B_{\lambda T}$ ;

- спектральный коэффициент излучения реального тела  $\epsilon_{\lambda T} < 1$ ; с его помощью можно установить связь между спектральными энергетическими яркостями:  $B_{\lambda T} = B_{0\lambda T} \cdot \epsilon_{\lambda T}$ ;

- интегральная энергетическая яркость абсолютно черного тела –  $B_{0T}$ ;

- интегральная энергетическая яркость реального тела –  $B_T$ .

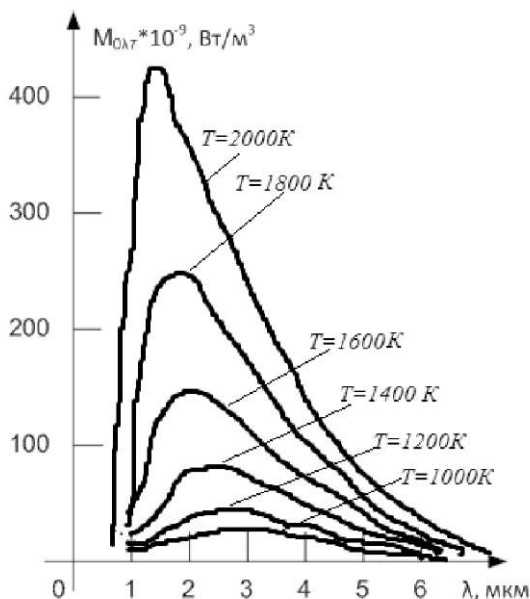
#### 4.9.1. Законы излучения

Законы излучения открыты для абсолютно черных тел. Закон Планка устанавливает соотношение между абсолютной температурой  $T$  и спектральной энергетической яркостью  $B_{0\lambda T}$  абсолютно черного тела:  $B_{0\lambda T} = f(T, \lambda)$ . Для видимой области спектра  $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3}$  мК справедлива формула Вина (являющаяся следствием закона Планка).

Закон Стефана – Больцмана получается как следствие закона Планка при интегрировании спектральной плотности излучения абсолютно черного тела по длинам волн от нуля до бесконечности, он устанавливает соотношение между интегральной энергетической яркостью абсолютно черного тела  $B_{0T}$  и абсолютной температурой:  $B_{0T} = \sigma / \pi T^4$ , где  $\sigma$  – постоянная, равная стандартному значению. Закон смещения Вина устанавливает связь между спектральной энергетической плотностью излучения, длиной волны и температурой.

Демонстрируемое на рис. 4.20 графическое представление закона, позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких длин волн;
- в видимой области спектра (0,4–0,7 мкм) темп роста спектральной плотности излучения от температуры очень высок. Например, при длине волны  $\lambda = 0,4$  мкм увеличение температуры от 1000°K до 2000°K вызывает изменение спектральной плотности излучения примерно в  $10^8$  раз.



**Рис. 4.20.** Иллюстрация к закону смещения Вина

Эти выводы используют для выбора интервала длин волн при технической реализации этого метода в реальные измерительные приборы.

Рассмотрим монохроматические пирометры, которые также называются квазимонохроматическими. В этих приборах реализована формула Вина:  $B_{0\lambda T} = f(T, \lambda)$ . Шкала монохроматических пирометров отградуирована по абсолютно черному излучателю, и поэтому приборы показывают условную температуру  $T_y$  (яркостную или псевдотемпературу). Отличие  $T_y$  от действительной температуры  $T_d$  тем больше, чем больше отличаются излучательные способности реальных тел от абсолютно черного тела.



Далее рассмотрим пирометры спектрального отношения или цветовые. Эти средства технически реализуют зависимость отношения спектральных энергетических яркостей при двух разных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от измеряемых температур. Приборы показывают условную температуру  $T_{ц}$  (также называемую цветовой).

Радиационные пирометры (пирометры полного или частичного излучения) основаны на законе Стефана–Больцмана  $B_{0T} = f(T^4)$  и показывают условную температуру  $T_p$  (радиационную температуру).

Все перечисленные пирометры при измерении температуры реальных тел показывают значения условных температур, и эти значения, как правило, занижены по сравнению с действительными значениями температур. Наименьшее отклонение от действительной имеет цветовая температура, а наибольшее – радиационная:

$$|T - T_{ц}| < T - T_p < T - T_r.$$

Пирометры излучения применяются для измерения температуры, как твердых тел, так и жидких сред и с некоторыми ограничениями для измерения температуры газов [7].

#### *4.9.2. Квазимонохроматический пирометр с исчезающей нитью*

Квазимонохроматический (оптический) пирометр с исчезающей нитью – это техническое средство, предназначенное для измерения температуры в видимой области спектра от  $700^\circ$  до  $4000^\circ$  С. Приборы показывают яркостную температуру, отличную от действительной, и при этом  $T_я < T_д$ . Эта объективная систематическая погрешность измерения входит в погрешность прибора. Если точность измерения реальной температуры, выполненная прибором, не удовлетворяет потребителя, то зная  $T_я$  и спектральный коэффициент излучения реального тела  $\epsilon_{\lambda T}$  можно вычислить  $T_д$ , используя известную зависимость, указанную в литературе [20, 21, 28].

Рассмотрим один из вариантов технической реализации данного пирометра по приложенной ниже схеме (рис.4.21).

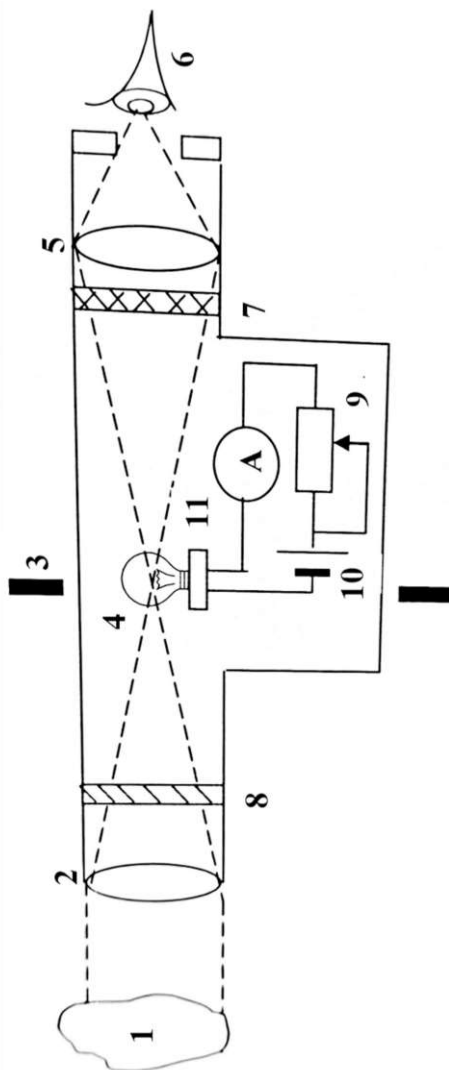


Рис. 4.21. Схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью

На рисунке 4.21 используются следующие обозначения: 1 – объект измерения с  $T_d$  и  $B_{\lambda T}$ ; 2 – объектив; 3 – фокусируемая плоскость; 4 – нить пирометрической лампы; 5 – окуляр; 6 – глаз наблюдателя; 7 – красный светофильтр; 8 – поглощающее стекло; 9 – рсостат для изменения накала нити; 10 – источник питания; 11 – прибор шкала которого отградуирована в значениях яркостной температуры.

Для монохроматизации (т.е., для выделения определенной длины волны) излучения применяется красный светофильтр 7. Именно красный светофильтр применяется потому, что вблизи видимого глазом спектра он имеет резкую границу пропускания, и можно измерять более низкие температуры.

Процесс измерения происходит следующим образом. Изменяя накал нити пирометрической лампы 4, добиваемся полного слияния яркости нити с фоном объекта измерения (то есть, нить должна исчезнуть). Нить пирометрической лампы отградуирована по температуре излучателя близкого к абсолютно черному телу и выполнена из вольфрама. Нагрев выше  $1400^{\circ}\text{C}$  нежелателен, так как нарушается стабильность характеристики нити. Для  $t > 1400^{\circ}\text{C}$  вводят поглощающее стекло 8, которое характеризуется коэффициентом пропускания  $\tau_{\lambda}$ .

Степень ослабления спектральной энергетической яркости поглощающим стеклом определяется пирометрическим коэффициентом ослабления:

$$A = \frac{1}{\tau_{\lambda}^1} - \frac{1}{\tau_{\lambda}^2},$$

где  $T_{\lambda}^1$  – яркостная температура с поглощающим стеклом;  $m_{\lambda}^1$  – яркостная температура по шкале пирометра без поглощающего стекла.

Рассмотренное средство измерения использует в качестве нуля-прибора человеческий глаз, именно с помощью глаза происходит сравнение спектральных энергетических яркостей реального тела и нити пирометрической лампы. Отсюда следует субъективная погрешность результата измерения.

На точность измерения тел по излучению оказывают влияние следующие факторы:

- неопределенность коэффициента теплового излучения реального тела  $\epsilon_{\lambda T}$ ;

- влияние промежуточной среды (запыленность и задымленность);
- влияние посторонних источников излучения;
- влияние температуры окружающей среды на оптические свойства устройств пирометра (коэффициент пропускания оптической системы).

Наиболее современным монохроматическим пирометром является визуальный пирометр «Проминь-М» с исчезающей нитью накала. Пирометр имеет цифровую индикацию и два исполнения:

- исполнение 1 с пределами (700...2000)°С с дискретным изменением 1°С;
- исполнение 2 с пределами (1800...4000)°С с дискретным изменением 2°С.

Предел допускаемой основной погрешности измерения яркостной температуры изменяется в пределах  $\pm 14^\circ\text{C}$  (при температуре 800°С) до  $\pm 80^\circ\text{C}$  (при температуре 4000°С).

Среднеквадратическое отклонение случайной основной погрешности изменяется соответственно от  $\pm 2,5$  до  $\pm 12^\circ\text{C}$ .

В данной главе рассматривались вопросы, связанные с измерением температуры, что очень важно на теплоэнергетических предприятиях, так как температура – один из наиболее часто измеряемых параметров. В главе были изложены определение температуры, общие сведения о ней и единицы измерения. Далее рассматривались различные приборы для измерения температуры – стеклянные и манометрические термометры, а также термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления.

Наряду с ними рассматривалось введение поправки на температуру свободных концов термопар, термоэлектрические провода и способы измерения термоЭДС, а также мостовые схемы и нормирующие преобразователи. В конце главы изучались бесконтактные методы измерения температуры, законы излучения и приборы для бесконтактного измерения температуры – оптические пирометры.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что называется температурой?
2. Объясните принцип действия автоматического уравновешенного моста.
3. Каков принцип действия жидкостных термометров?
4. Что является источниками погрешностей при измерении температуры жидкостными термометрами?
5. На какие категории делятся манометрические термометры? Чем отличаются друг от друга эти категории?
6. На каких явлениях основан принцип работы термоэлектрического преобразователя?
7. Из каких материалов изготавливают термоэлектрические преобразователи?
8. Каким образом вводится поправка на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя?
9. Какие требования предъявляются к термоэлектродным проводам?
10. В чем преимущества и недостатки уравновешенного моста по сравнению с неуравновешенным?
11. Из каких материалов изготавливают термопреобразователи сопротивления?
12. Для каких целей применяются нормирующие преобразователи?
13. Начертите структурную схему нормирующего преобразователя для термометров сопротивления, объясните принцип работы преобразователя.
14. Какие существуют унифицированные токовые сигналы? Какие из этих сигналов применяются в настоящее время наиболее часто?
15. Что может быть источником погрешности при измерении температуры термопреобразователем сопротивления?

## Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

Давление относится к числу весьма распространенных измеряемых величин на тепловых объектах. *Давление* – это нормально распределенная сила, действующая со стороны одного тела на единицу поверхности другого [20, 21, 28]. Единицей измерения в системе СИ является паскаль (Па), который равен давлению, создаваемому силой в один ньютон, действующий на площадь в один квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ). Применяются также кратные единицы кПа и МПа. Допускается использование внесистемных единиц таких, как килограмм-сила на квадратный сантиметр ( $\text{кгс/см}^2$ ) и квадратный метр ( $\text{кгс/м}^2$ ), последняя численно равна миллиметру водяного столба (мм.вод.ст).

При измерениях различают атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления. Средства измерения, предназначенные для измерения атмосферного давления называются *барометрами*.

*Абсолютное давление* – это полное давление, которое равно сумме атмосферного давления  $P_{\text{ат}}$  и избыточного  $P$ :

$$P_a = P + P_{\text{ат}}$$

Для измерения абсолютного давления предназначены манометры абсолютного давления.

*Избыточное давление* – это давление выше атмосферного, т.е:

$$P_a = P_a - P_{\text{ат}}$$

Для измерения избыточного давления предназначены средства измерения, называемые *манометрами*. Если избыточное давление  $< 40$  кПа, то приборы для измерения такого давления называются *напоромерами*.

*Вакуумметрическое давление* -- это давление ниже атмосферного:

$$P_{\text{в}} = P_{\text{ат}} - P_a$$

Приборы для измерения этого давления называются *вакуумметрами*. Если разрежение  $< 40$  кПа, то приборы для измерения называются *тягомерами*.

Для измерения разности давлений предназначены *дифманометры*.

В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения другой физической величины, средства измерения давления разделяются на жидкостные, деформационные, грузопоршневые, электрические, ионизационные и тепловые[4]. Ниже мы рассмотрим некоторые из названных приборов для измерения давления.

### 5.1. Жидкостные манометры и дифманометры

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости, определяемым по формуле [20, 21, 28]:

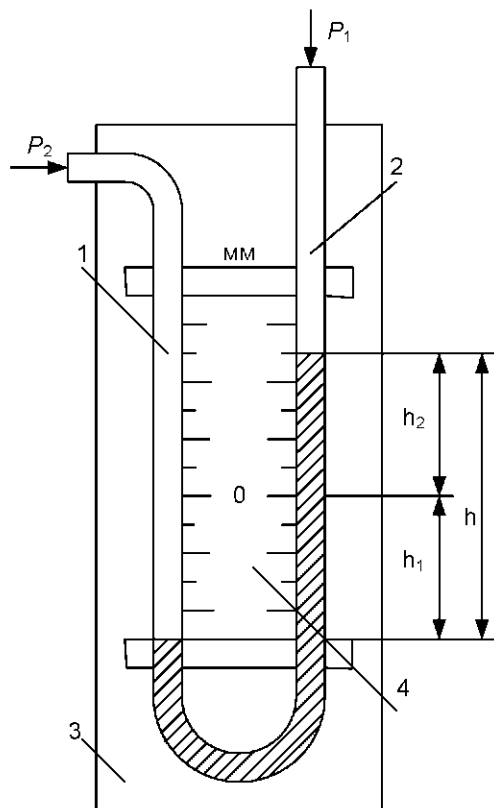
$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (5.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота столба жидкости.

Большинство жидкостных манометров имеют видимый уровень жидкости, по которому производится непосредственное снятие показаний. Эти приборы используются в лабораторной практике и при проведении промышленных испытаний.

Точность этого метода определяется точностью измерения уровня, включает субъективную погрешность (навык наблюдателя), зависит от конструктивных элементов прибора и рода рабочей жидкости. При изменении температуры изменяется значение плотности рабочей жидкости и это приводит к погрешности измерения.

На рисунке 5.1 представлена схема двухтрубного U-образного манометра, где  $P_1 > P_2$ . Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1,2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена шкальная пластинка 4.



**Рис. 5.1. Схема двухтрубного U-образного манометра**

Столб жидкости высотой  $h = h_1 + h_2$  уравнивает разность давлений  $P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h$ . Откуда:

$$h = (P_1 - P_2) / \rho \cdot g,$$

где  $\rho$  – плотность рабочей жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – местное ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

## 5.2. Микроманометры

Для измерения давления и разности давления до 3 кПа используется микроманометры (рис 5.2), которые являются разновидностью однотрубных манометров [20, 21, 28].



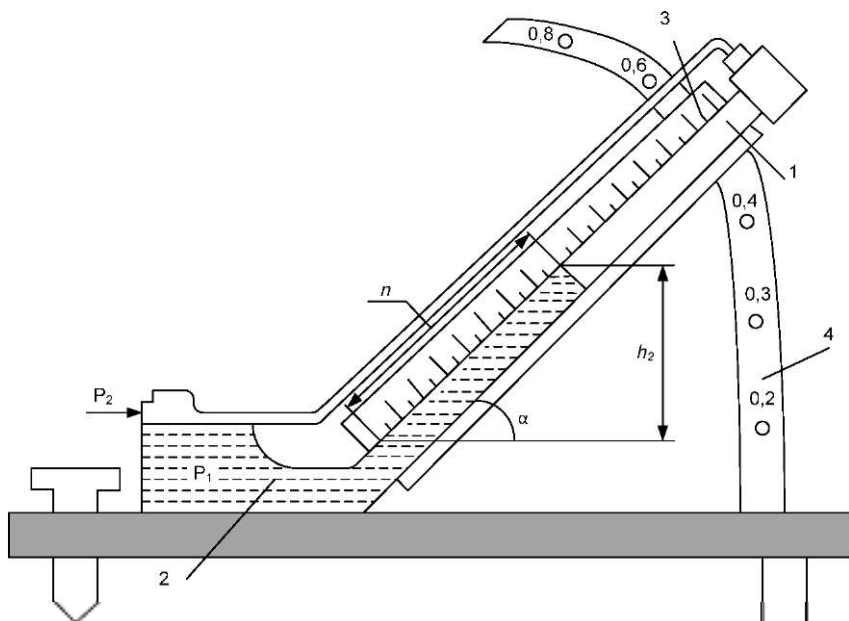


Рис. 5.2. Схема микроманометра

Показания микроманометра определяются по длине столбика рабочей жидкости  $n$  в измерительной трубке 1, имеющий угол наклона  $\alpha$ .

Исходя из равенства объемов рабочей жидкости, вытесненной из широкого сосуда 2 в измерительную трубку 1, получаем:

$$h_1 F = n \cdot f;$$

или

$$h_1 = n \cdot f / F,$$

где  $h_1$  – измерение уровня в широком сосуде;  $F \cdot f$  – площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки.

Поскольку  $h_2 = n \sin \alpha$ , то  $p_1 - p_2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g n (f / F + \sin \alpha)$ . При определенной плотности жидкости и нормальном ускорении свободного падения все множители при  $n$  обозначают коэффициентом  $k$  – постоянная микроманометра, изменяющимся от 0,2 до 0,8. Отсюда уравнение изменения микроманометром:  $\Delta P = n \cdot k$ . При  $k = 0,2$  самая высокая чувствительность прибора, а при  $k = 0,8$  – максимальный верхний предел измерения. Микроманометры являются лабораторными средствами измерения давления и разности давлений.

Для воспроизведения единицы измерения давления и эталонных измерений в метрологии применяются компрессионные манометры [7].

Достоинством рассмотренных жидкостных манометров и дифманометров является их простота и надежность при достаточно высокой точности измерений ( $\pm 1\%$ ).

### 5.3. Деформационные манометры и дифманометры

В деформационных манометрах используется зависимость деформации чувствительного элемента  $h$  или развиваемой им силы  $F$  от измеряемого давления [20, 21, 28].

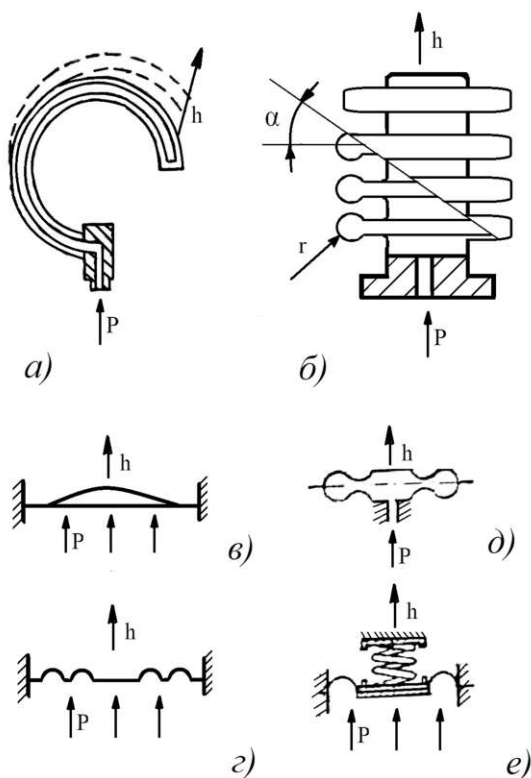


Рис. 5.3. Чувствительные элементы деформационных манометров

Чувствительные элементы – это, как правило, упругие элементы, а именно: трубчатая манометрическая пружина (рис. 5.3 а); сильфон (рис. 5.3 б); плоская или гофрированная мембрана (рис. 5.3 в и г); мембранная коробка (рис. 5.3.д) и вялая мембрана (рис. 5.3 с), применяемая в напоромерах и тягомерах.

### *5.3.1. Пружинные манометры*

Чувствительный элемент пружинного манометра – это трубчатая манометрическая пружина [20, 21, 28]. Диапазон измеряемых избыточных давлений составляет от 0.1 до  $10^3$  МПа и вакуумметрических – от 0.1 до 0 МПа. Выпускаются приборы следующих разновидностей: образцовые (класс точности 0,15;0,25;0,4); рабочие (класс точности 1,5; 2,5; 4) и повышенной точности (класс точности 0,6;1). Манометры могут быть показывающие, самопишущие, регистрирующие, сигнализирующие, а также с электрическими или пневматическим выходным сигналом (преобразователи).

Полые одновитковые трубчатые пружины (рис 5.3.а), имеют эллиптическое или плоскоовальное сечение. Один конец пружины, в который поступает измеряемое давление, закреплен неподвижно в держателе, второй (закрытый) может перемещаться. Под действием разности измеряемого внутреннего давления и внешнего атмосферного трубчатая пружина деформируется: малая ось сечения трубки увеличивается, большая уменьшается, при этом пружина раскручивается, и ее свободный конец совершает перемещение  $h=1-3$  мм.

При рассмотрении измерения как непрерывного процесса преобразований, можно измерение давления пружинным показывающим манометром представить в следующем виде: измеряемое давление  $P$  – деформация трубчатой манометрической пружины, выраженная через пропорциональное перемещение рабочей точки –  $h$  – элементы кинематической связи перемещения  $h$  положением стрелки прибора, шкала которого проградуирована в единицах измеряемого давления.

### *5.3.2. Сильфонные и мембранные манометры*

Чувствительными элементами в сильфонных и мембранных являются сильфон (рис. 5.3 б) и мембраны: плоские (рис. 5.3 в), гофрированные (рис. 5.3 г), мембранные коробки (рис. 5.3 д) и вялые

с жестким центром (рис. 5.3 е). Область применения этих приборов: измерение малых избыточных давлений и разрежения [20, 21, 28].

Сильфоны (рис. 5.3 б) нашли широкое применение в приборах давления с силовой компенсацией.

Плоские мембраны (рис. 5.3 в), имеющие нелинейную упругую характеристику и малые перемещения жесткого центра под действием измеряемого давления используются в преобразователях давления: пьезоэлектрических, тензопреобразователях, емкостных и резонансных.

Гофрированные мембраны (рис. 5.3 г) и мембранные коробки (рис. 5.3 д), имеющие улучшенную статическую характеристику, близкую к линейной, нашли применение в приборах для измерения напора и разрежения.

Для измерения малых давлений применяются вялые мембраны (рис. 5.3 е).

Промышленностью выпускаются механические показывающие самопишущие манометры (МТП, МТС), вакуумметры (ВТП, ВТС) и мановакуумметры (МВТП, МВТС) с одновитковой трубчатой пружиной. Класс точности манометров 1; 1,5; 2,5. Сильфонные чувствительные элементы используются в механических показывающих и самопишущих дифманометрах типа ДСП и ДСС. Дифманометры типа ДС могут иметь сигнализирующее устройство.

Мембранные упругие чувствительные элементы, чаще в виде мембранных коробок, используются в приборах для измерения напора и разрежения. Промышленностью выпускаются реле (сигнализаторы) напора и тяги типа РД, которые работают в диапазоне от  $-12$  до  $12$  кПа

Измерение давления манометрами – это прямые измерения или преобразования, в которых давление непосредственно через деформацию упругого чувствительного элемента преобразуется или в показания прибора или с помощью промежуточного преобразователя в электрический или в пневматический нормированный выходной сигнал.

### *5.3.3. Деформационные преобразователи давления*

Давление – это неэлектрическая физическая величина, и передача информации об измеряемом давлении на расстояние потребовала разработки ряда деформационных преобразователей,

позволяющих перемещение упругих чувствительных элементов преобразовать в унифицированные электрические или пневматические сигналы, которые поступают на вторичные приборы или в системы автоматического управления [20, 21, 28].

Принцип преобразования давления и перепада давления в электрический или пневматический сигналы определил название этих преобразователей. Рассмотрим некоторые из них в порядке развития технического прогресса: дифференциально-трансформаторные (ДТП), преобразователи с компенсацией магнитных потоков, тензопреобразователи, преобразователи с силовой компенсацией, интеллектуальные преобразователи давления.

#### *5.3.4. Дифференциально-трансформаторные преобразователи*

Дифференциально-трансформаторный преобразователь или ДТП – это, прежде всего передающий преобразователь, предназначенный для преобразования линейного перемещения упругого чувствительного элемента в унифицированный выходной сигнал [20, 21, 28].

Рассмотрим последовательность преобразований происходящих в ДТП на примере реального технического средства – дифманометра типа ДМ.

Мембранные дифманометры типа ДМ (рис. 5.4) предназначены для измерения и преобразования перепада давлений и используется при измерении таких физических величин, как уровень и расход, если для измерения уровня применяется гидростатические (дифманометрические) уровнемеры, а расход измеряется по переменному перепаду давлений на сужающем устройстве.

Чувствительным элементом в этих приборах является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок. Внутренние полости коробок соединены и заполнены дистиллятом или кремнийорганической жидкостью. Верхняя мембранная коробка находится в минусовой камере, которая соединена с меньшим измеряемым давлением. Нижняя мембранная коробка находится в плюсовой камере дифманометра.

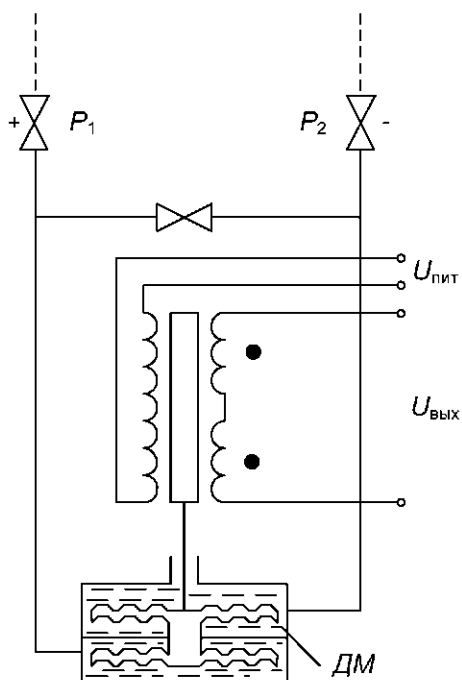


Рис. 5.4. Схема мембранного дифманометра

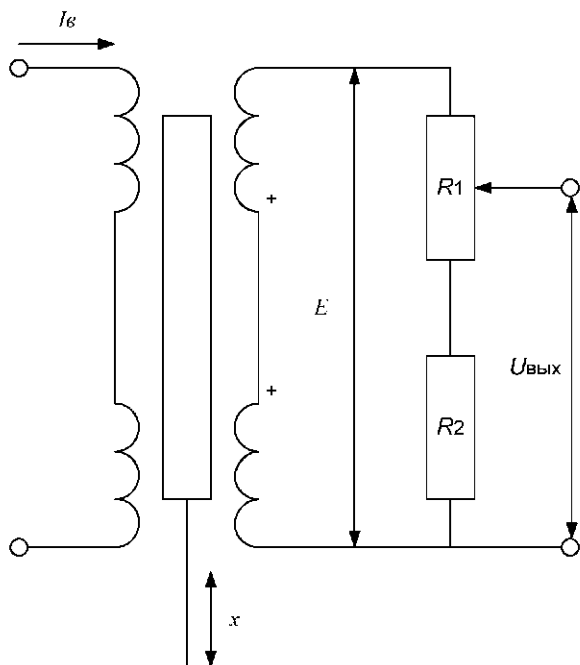
Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается, и часть воды перетекает в верхнюю мембранную коробку, вызывая ее деформацию и перемещение сердечника. Нижняя мембранная коробка имеет малую жесткость, и с ее помощью осуществляется компенсация температурных изменений объема жидкости, находящейся внутри мембранного блока.

Мембранный блок выполняет первый этап преобразования: измеряемый перепад давления  $\Delta P = P_1 - P_2$  преобразован в линейное перемещение сердечника. Дальнейшее преобразование перемещения в унифицированный сигнал осуществляется в ДТТ, расположенном в головке дифманометра типа ДМ.

Для удобства изучения принципа действия ДТТ представим его схему отдельно на рис. 5.5.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи (ДТП) предназначены для преобразования линейного перемещения сердечника (связанного с чувствительным элементом) в выходной электрический сигнал.

Принцип действия их основан на зависимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой от положения сердечника.



**Рис. 5.5. Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя**

Преобразователь (рис 5.5) представляет собой трансформатор, имеющий обмотку возбуждения  $I_b$ , и две секции вторичной обмотки, включенные встречно, дифференциально (отсюда название – дифференциально-трансформаторный). Создаваемый ток обмотки возбуждения  $I_b$  магнитный поток обмотки возбуждения пронизывает обе секции вторичной обмотки. Часть этого потока  $\Phi_1$  пронизывает секцию 1, индуцируя в ней ЭДС  $e_1$ ; часть потока  $\Phi_2$  пронизывает секцию 2, индуцируя в ней ЭДС  $e_2$ . Поскольку секции вторичной обмотки включены встречно, то ЭДС  $E$  всей вторичной обмотки будет определяться как разность  $e_1$  и  $e_2$ :

$$E = e_1 - e_2 = 2 \pi f I_b (M_1 - M_2) - 2 \pi f I_b M, \quad (5.2)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения обмоткой преобразователя;  $f, I_b$  – частота и ток возбуждения.

В среднем положении сердечника (когда он поровну перекрывает обе секции) потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , а следовательно и  $e_1$  и  $e_2$  равны между собой, тогда  $E=0$ . При смещении от среднего положения вниз ЭДС будет увеличиваться (по модулю), но фаза ее будет обратной.

Из-за допусков, принятых при изготовлении, ЭДС ( $\mathcal{E}$ ) вторичной обмотки различных экземпляров ДПП различна при одинаковых перемещениях  $X$ . Для унификации выходных сигналов (строгой зависимости выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  от входного  $X$ ) в цепь вторичной обмотки введен делитель  $R_1$  и  $R_2$ . Смещением движка резистора  $R_1$  можно добиться одинаковой зависимости сигнала  $U_{\text{вых}}=f(x)$ . При градуировке (поверке) первичного и вторичного приборов верхний предел взаимной индуктивности можно менять (передающего на  $\pm 25\%$ , компенсирующего на  $\pm 15\%$ ) с помощью регулируемого резистора  $R_1$  делителя.

Завершено рассмотрение следующего этапа преобразования: линейное перемещение  $X$ , пропорциональное измеряемому перепаду давления, преобразовано в выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Особенность ДПП заключается в том, что выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$  является слабым, плохо защищенным и предназначен только для дальнейшего измерения вторичным прибором. Для измерения  $U_{\text{вых}}$  с дифманометром типа ДМ во вторичном приборе (типа КСД) находится подобный ДПП.

Схема дистанционной передачи с использованием унифицированных ДПП представлена на рис. 5.6.

Схема представлена измерительной системой, где первичный ДПП (передающий преобразователь) обычно установлен вблизи технологического оборудования, где на его чувствительной элемент (мембранный блок) воздействует измеряемая величина ( $P$  или  $\Delta P$ ), а вторичный прибор, содержащий ДПП (компенсирующий) установлен на щите управления (БЩУ или МЩУ). Сигнал от первичного преобразователя по линии связи передается на вторичный прибор на расстоянии, как правило, 0,3–0,8 км.



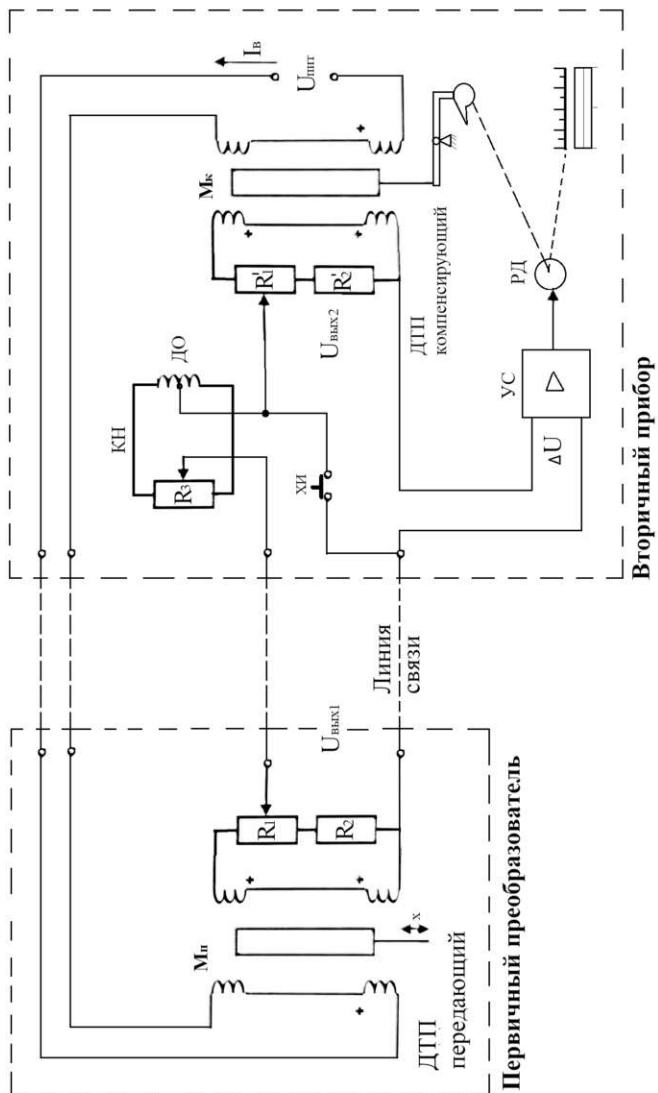


Рис. 5.6. Схема дистанционной передачи с использованием унифицированных ДТП

Первичные обмотки передающего и компенсирующего преобразователей включены последовательно и подключены к одному источнику питания переменного тока  $U_{пит}$ . Вторичные обмотки ДТП передающего и компенсирующего преобразователей включены встречно по компенсационной схеме и, следовательно на вход усилителя (УС) поступает сигнал, равный разности выходных напряжений преобразователей:

$$\Delta U = U_{вых1} - U_{вых2}$$

Этот сигнал усиливается и передается на реверсивный двигатель (РД) и с него на шкалу вторичного прибора и одновременно на профильный кулачок, который преобразует вращательное движение РД, в поступательное перемещение сердечника компенсирующего ДТП до состояния когда  $\Delta U = 0$ , и стрелка прибора установится на значении измеряемой величины.

Профильный кулачок выполняет линейную зависимость при измерении  $P$  и  $\Delta P$ , уровня или квадратичную – при измерении расхода в момент передачи информации на сердечник компенсирующего ДТП.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи просты по устройству, надежны в работе. Использование компенсационного метода в системе дистанционной передачи показаний позволяет снизить погрешность от изменения напряжения питания и активного сопротивления линии связи. Однако им присущи и недостатки. Так, к первичному преобразователю с ДТП можно подключать одновременно только один вторичный прибор. При использовании ДТП с управляющими машинами необходимо применить промежуточные нормирующие преобразователи, преобразующих сигнал 0–10 мВн в сигнал постоянного тока 0–5 мА. Кроме того, система дистанционной передачи с ДТП, как и все системы передач на переменном токе, подвержена влиянию внешних магнитных полей и соседних линий связи (например, при совместной прокладке их в одном кабеле). Результатом такого влияния может быть значительная дополнительная погрешность. Следует также отметить, что в системах передач на переменном токе накладываются ограничения на емкость между каждой парой проводов, так как их чрезмерное увеличение также приводит к появлению дополнительной погрешности. Указанных недостатков лишены преобразователи с компенсацией магнитных потоков.

Дифманометры типа ДМ имеют в соответствии со стандартным рядом верхний предел измерения от 1,6 кПа до 0,63 МПа при статическом давлении 6,3; 25; и 63 МПа, класс точности дифманометров 1; 1.5.

С аналогичным мембранным блоком выпускается дифманометры ДМЭ, ДМЭР и ДМЭУ с компенсацией магнитных потоков.

### *5.3.5. Преобразователи с компенсацией магнитных потоков*

Переданные преобразователи с магнитной компенсацией предназначены для преобразования линейного перемещения чувствительного элемента первичного прибора в унифицированной выходной сигнал постоянного тока, т.е., алгоритм их работы можно условно представить следующим образом:  $P, \Delta P (L \text{ или } l') \rightarrow I_{\text{вых}} \rightarrow \text{ВП (ПЭВМ, система регулирования)}$  [20, 21, 28].

Принцип действия заключается в том, что управляющий магнитный поток, создаваемый в специальном устройстве – индикаторе магнитных потоков – при перемещении подвижного элемента постоянного магнита (перемещаемого чувствительным элементом первичного преобразователя), компенсируется магнитным потоком обратной связи, создаваемым в этом же индикаторе током обратной связи

Рассмотрим создание управляющего магнитного потока.

Магнитная система преобразователя (рис. 5.7) состоит из двух магнитопроводов, двух индикаторов магнитных потоков и расположенного между ними подвижного магнита. Для упрощения рассмотрения принципа образования магнитного потока  $\Phi_M$  рассмотрим схему магнитных потоков лишь в одном магнитопроводе. Основной магнитный поток  $\Phi_1$  постоянного магнита 1 замыкается через магнитопровод 2. Меньшие потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  замыкаются через магнитопровод индикатора магнитных потоков 3. Потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  направлены навстречу друг другу. Магнитный поток  $\Phi$  представляет собой разность потоков  $\Phi$  и  $\Phi$ , т.е. результирующий поток, протекающий по магнитопроводу индикатора  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$ .

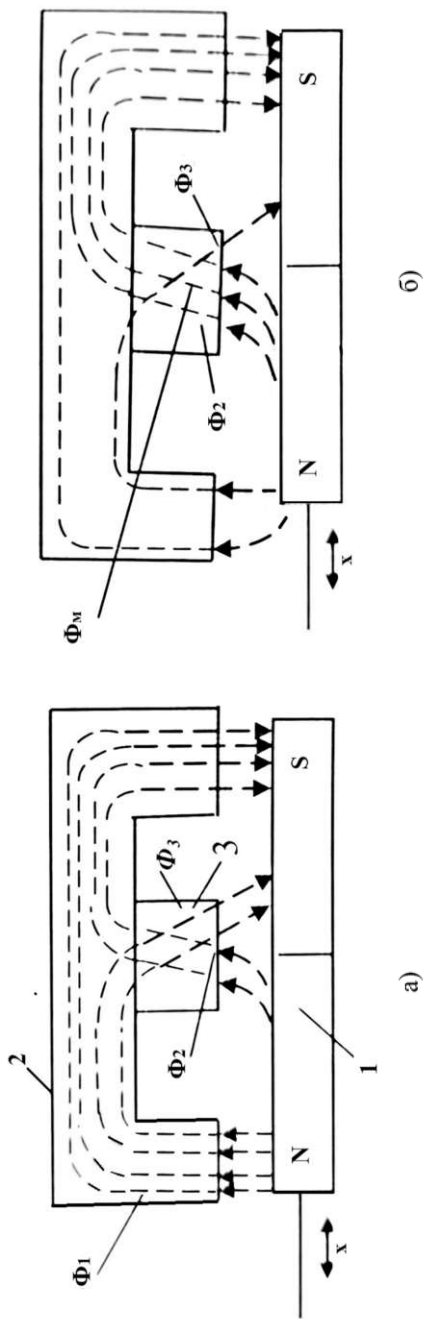


Рис. 5.7. Схема магнитной системы преобразователя

В среднем положении магнита потока  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  равны и противоположно направлены, поэтому результирующий поток  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$  практически отсутствует. При смещении магнита, например, вправо, по магнитопроводу индикатора 3 начинает протекать результирующий магнитный поток  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$  определенного направления. Интенсивность этого потока зависит от степени смещения магнита от нейтрального положения. Поскольку магнит смещается чувствительным элементом и, следовательно, это смещение определяется значением измеряемой величины, результирующий магнитный поток  $\Phi_M$  также зависит от этого значения.

На магнитопроводе индикатора размещены обмотка возбуждения, питаемая пульсирующим током, и обмотка обратной связи, по которой протекает постоянный ток обратной связи. Преобразователь с магнитной компенсацией содержит один подвижный магнит, два вспомогательных магнитопровода и два индикатора магнитных потоков I и II (рис 5.8).

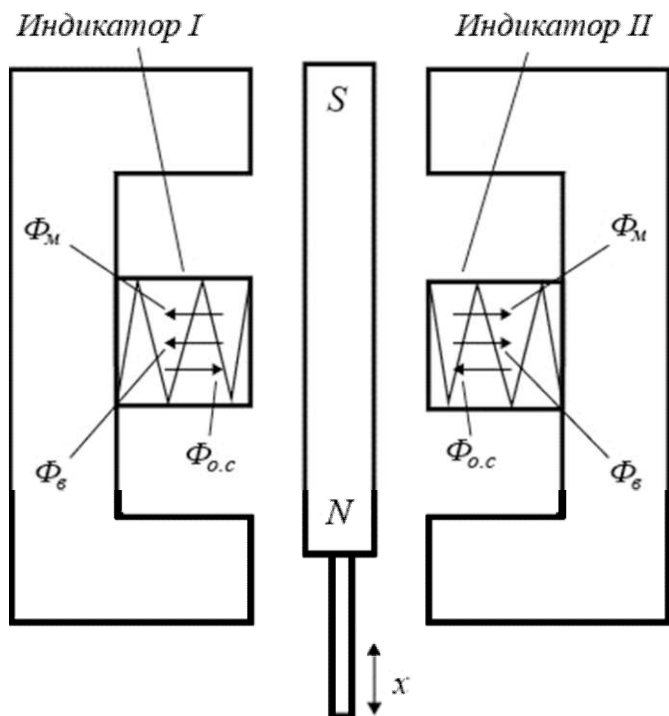


Рис. 5.8. Схема преобразователя с магнитной компенсацией

Преобразование магнитного потока  $\Phi_M$  в постоянный выходной ток рассмотрим, используя электрическую схему преобразователя (рис. 5.9). Обмотки возбуждения  $\omega_B$ , индикаторов I и II и резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образует измерительный мост. В одну диагональ этого моста подводится напряжение питания  $U_n$ , а с другой снимается выходной сигнал  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}} = I_1 R_1 - I_2 R_2$ , где  $R_1 = R_2$ .

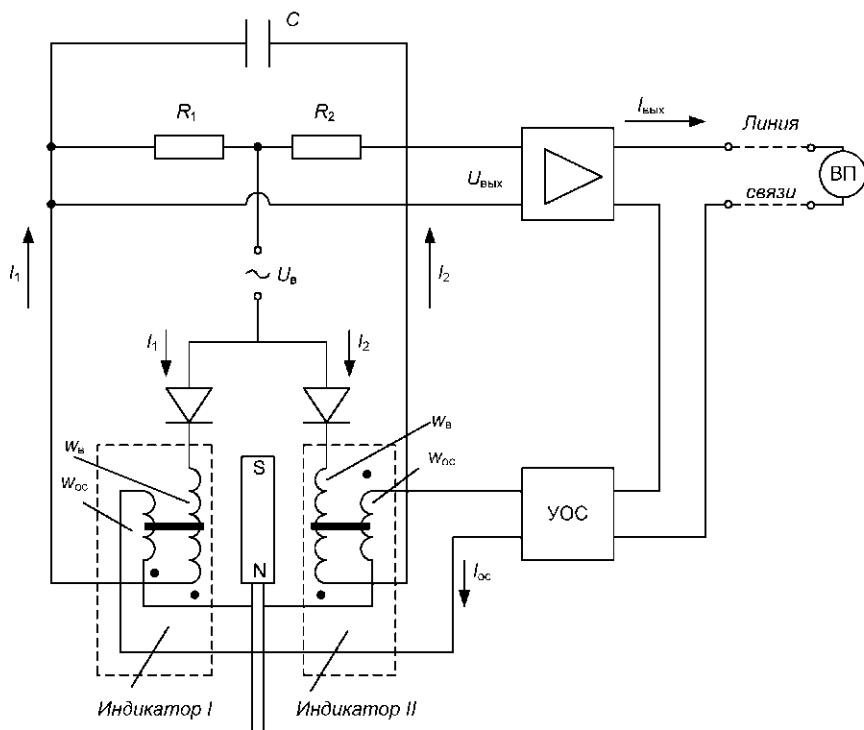
Если  $I_1 = I_2$ , то  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ . Для создания зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Phi_M)$ , а следовательно, и  $X$  , т.е чтобы  $I_1 \neq I_2$ , в работе преобразователя используется явление магнитного насыщения материала магнитопровода индикатора магнитных потоков, которое сопровождается резким уменьшением индуктивности и полного сопротивления обмоток, что приводит к резкому возрастанию значений токов в этих обмотках.

Для реализации зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Phi_M)$  в индикаторе I поток  $\Phi_B$  складывается с управляющим магнитным потоком  $\Phi_M$ , а в индикаторе II они вычитаются (тормозится момент наступления явления магнитного насыщения). Это приводит к тому, что в магнитопроводе индикатора I состояние насыщения наступит раньше, чем в магнитопроводе индикатора II, а следовательно резкое увеличение тока  $I_1$  происходит раньше тока  $I_2$ . Отсюда падение напряжения на  $R_1$  будет больше, чем на  $R_2$ ,  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Phi_M) \neq 0$ . Это напряжение усредняется емкостью (С) и поступает на вход усилителя, который преобразует его в выходной ток  $I_{\text{ВЫХ}}$ . Для реализации отрицательных обратной связи ток обратной связи  $I_{\text{о.с}}$  пропорциональной току  $I_{\text{ВЫХ}}$  вызовет появление потока  $\Phi_{\text{о.с}}$ , компенсирующего потока  $\Phi_M$ . При этом восстановится приближенное равенство  $I_1 \approx I_2$  для любого момента времени.

Статическая характеристика преобразователя  $I_{\text{ВЫХ}} = f(x)$  определяется видом зависимости  $I_{\text{о.с}} = f(I_{\text{ВЫХ}})$ . Если  $I_{\text{о.с}} = k_1 I_{\text{ВЫХ}}$ , то  $I_{\text{ВЫХ}} = k_2 x$ , если  $I_{\text{о.с}} = k_3 I_{\text{ВЫХ}}^2$ , то  $I_{\text{ВЫХ}} = k_4 \sqrt{x}$  ( $k_1 \dots k_4$  – постоянные коэффициенты,  $x$  – смещение магнита).

Выходной сигнал преобразователей (унифицированный сигнал постоянного тока 0–5мА) по линии дистанционной передачи поступает на вторичные приборы или другие устройства.

Преобразователи с магнитной компенсацией обладают рядом достоинств: возможностью подключения нескольких вторичных приборов к одному преобразователю, достаточно высокой виброустойчивостью и надежностью.



**Рис. 5.9. Электрическая схема преобразователя с магнитной компенсацией**

Недостатки этих преобразователей – довольно высокая температурная погрешность и невозможность работы в среде, вредно влияющей на элементы электронной схемы усилителей (находящиеся в корпусе первичного преобразователя). Преобразователи этого типа имеют класс 1 и 1,5 и выпускаются следующих типов: МПЭ-МИ; ДСЭ-МИ; ДМЭ-МИ; ДМЭР-МИ.

В качестве вторичных приборов используется миллиамперметры или многошкальные узкопрофильные приборы.

### **5.3.6. Манометры с тензопреобразователями**

Манометры с тензопреобразователями применяются для преобразования неэлектрических величин (давления и перепада давления) в унифицированный токовый сигнал постоянного тока: от 0 до 5, от 0 до 20 и от 4 до 20 мА [20, 21, 28].

Действие измерительных тензопреобразователей основано на изменении электрического сопротивления тензочувствительного элемента (тензорезистора) при его деформации. Тензорезисторы должны иметь стабильные характеристики, малый температурный коэффициент электрического сопротивления и высокую чувствительность. Этим требованиям отвечают следующие материалы: из металлов – константан, сплавы меди и никеля, никеля и хрома, а из полупроводниковых – кремний. Последний обладает более высокой тензочувствительностью по сравнению с металлическими, малыми размерами и массой.

Электрические манометры с тензопреобразователями – это совокупность двух блоков: измерительного и электронного.

Измерительный блок – это чувствительный элемент тензопреобразователя. Конструктивно измерительные блоки представлены двумя типами: давления и силы [20, 21, 28].

Чувствительный элемент тензопреобразователя давления – это двухслойная мембрана: титановый слой (металлический) контактирует с измеряемой средой, а припаянная к ней сапфировая мембрана с напыленными кремниевыми резисторами образует тензомост, выходное напряжение с которого поступает на электронный блок.

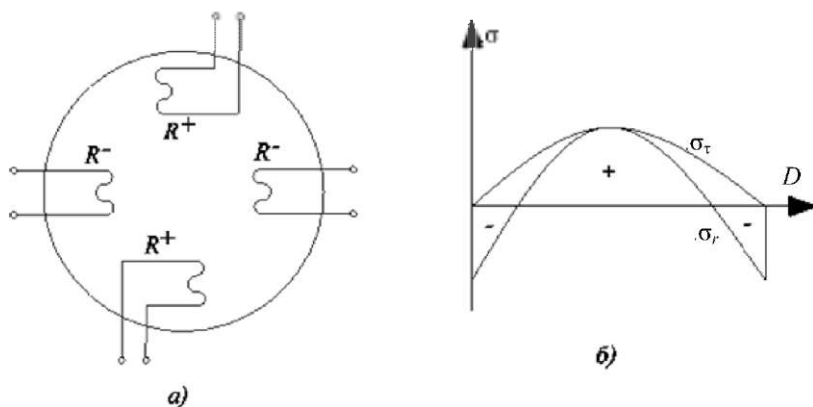
Тензомост образован четырьмя тензорезисторами (рис. 5.10а) расположенными в соответствии с эпюрой деформаций (рис. 5.10б): два – радиально, а два касательно (тангенциально). Таким размещением тензорезисторов достигается максимальная чувствительность чувствительного элемента тензопреобразователя.

Измерительный блок осуществляет первый этап преобразования, а именно: измеряемое давление или перепад давлений, воздействуя на двухслойную мембрану, деформирует её и расположенные на ней тензорезисторы преобразуют деформацию в изменение сопротивлений тензомоста, что приводит к изменению выходного напряжения.

Электронный блок предназначен для измерения выходного напряжения тензомоста и преобразования его в нормированный токовый сигнал постоянного тока.

Различают электронные блоки для аналогового тензопреобразователя и для микропроцессорного.





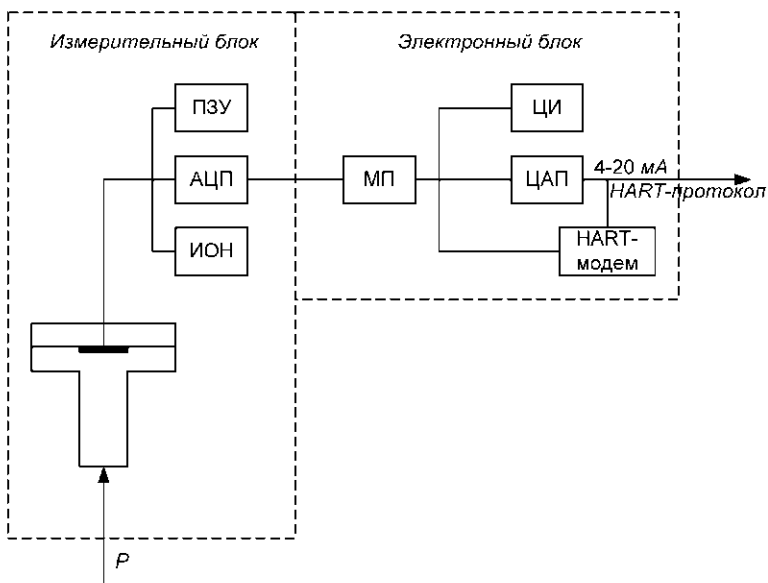
**Рис. 5.10.** Схема размещения тензорезисторов на поверхности мембраны и эпюра напряжений

В аналоговых тензопреобразователях (типа Сапфир – 22, Метран – 46) электронный блок реализует систему с глубокой отрицательной связью, обеспечивающую нормирование выходного сигнала, температурную компенсацию и коррекцию диапазона измерения и его пределов. Известны следующие модификации преобразователей типа «Сапфир22»: для преобразования избыточного давления (ДИ), вакуума (ДВ), избыточного давления и вакуума (ДИВ), абсолютного давления (ДА), разности давлений (ДД), гидростатического давления (ДГ).

Микропроцессорные интеллектуальные тензопреобразователи (типа Метран-100) представлены измерительным блоком (сенсором) и электронным блоком (рис. 5.11).

В сенсоре помимо чувствительного элемента размещена плата АЦП, на которой дополнительно находятся источник опорного напряжения ИОН и ПЗУ, в которое записывается информация об измерительном блоке и коэффициенты коррекции, рассчитанные по его экспериментальным характеристикам, что обеспечивает взаимозаменяемость сенсора.

Электронный блок включает микропроцессор МП, ПЗУ, ЦАП, HART – модем, блок цифровой индексации ЦИ. Микропроцессор производит линеаризацию характеристики чувствительного элемента, изменение диапазона выходного сигнала, температурную коррекцию и пр.[7].



**Рис. 5.11. Структурная схема микропроцессорного преобразователя давления**

В микропроцессорном электронном блоке тензопреобразователя типа АИР выходное напряжение с измерительного блока корректируется мостом температурной компенсации и через АЦП поступает в микропроцессор для дальнейшей обработки, нормирования и представления информации об измеряемом давлении в форме удобной для пользователя.

Манометры с тензопреобразователями имеют самое высокое быстродействие.

Основным достоинством этих технических средств является использование небольших деформаций чувствительных элементов, что повышает их надежность и стабильность характеристик, а также обеспечивает виброустойчивость. При осуществлении тщательной температурной компенсации предельная приведенная погрешность приборов составляет  $\pm 0,075\%$ ,  $\pm 0,1\%$ .

Рассмотренный метод измерения давления и перепада давления на современном уровне технического прогресса является самым перспективным для автоматизированных систем управления тепловыми процессами, вытесняя с рынка средств измерения все остальные (ДМ, ДМЭ, ДМЭР, ДМЭУ и т.д.).

В пятой главе данного пособия рассматривались вопросы, связанные с измерением давления и разности давлений. В начале главы приводились общие сведения о давлении, затем рассматривались жидкостные манометры, после них – деформационные. При изучении деформационных манометров сначала рассматривались чувствительные элементы (манометрические пружины, мембраны, сильфоны), затем – манометры с этими чувствительными элементами. Далее изучались дифференциально-трансформаторные преобразователи давления, а также преобразователи с компенсацией магнитных потоков, и в конце главы – манометры с тензопреобразователями.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. В каких единицах измерения измеряется давление в системе СИ?
2. Какие существуют внесистемные единицы измерения давления? Как они связаны с единицами системы СИ?
3. Что называется абсолютным давлением? Избыточным давлением?
4. Как называется прибор для измерения разности давлений?
5. Каков принцип работы жидкостных манометров?
6. Влияет ли изменение температуры на показания  $U$ -образного манометра? Если да, то каким образом?
7. Как влияет на точность измерений микроманометром угол наклона трубки?
8. На чем основан принцип действия деформационных манометров?
9. Какие существуют чувствительные элементы деформационных манометров?
10. Какую геометрическую форму имеет поперечное сечение манометрической пружины?
11. В каких приборах для измерения давления применяются гофрированные мембраны и мембранные коробки?
12. В каких приборах для измерения давления применяются вялые мембраны?
13. Каков принцип действия дифференциально-трансформаторных преобразователей?
14. Какой сигнал имеют на выходе преобразователи с компенсацией магнитных потоков?
15. Начертите структурную схему тензомоста, дайте необходимые пояснения.
16. Каковы достоинства и недостатки манометров с тензопреобразователями?

## Глава 6. ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВА

Дадим сначала определение расхода. Расход есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода в единицу времени. Приборы для измерения мгновенного расхода вещества называются расходомерами. Для измерения расхода за определенный интервал времени используются счетчики количества (счетчики) [20, 21, 28]. Иногда для измерения суммарного расхода расходомеры снабжаются интеграторами (счетчиками).

Различают расход массовый и объемный  $G_m$  и  $G_v$ . Единицы массового расхода  $G_m$  [кг/с; кг/ч; т/ч], а объемного расхода  $G_v$  [м<sup>3</sup>/с; л/с; м<sup>3</sup>/ч].

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков [20, 21, 28].

Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров:

- переменного перепада давления с сужающими устройствами (самый массовый метод на тепловых объектах)
- постоянного перепада давления (ротаметры);
- тахометрические;
- электромагнитные (индукционные);
- ультразвуковые;
- вихревые.

Ниже рассмотрим некоторые из них.

### 6.1. Расходомеры переменного перепада давления с сужающими устройствами

В основе метода измерения лежит принцип, заключающийся в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства (СУ) повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а, следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен по перепаду давления  $\Delta P$ , измеренному дифманометром в соответствии с градуировочной характеристикой  $G = k\sqrt{\Delta P}$ .

Измерение расхода этим методом реализуется измерительной системой (ИС), где СУ – первичный преобразователь неподвижно установленный в трубопроводе. Дифманометр – вторичный прибор (ВП) для измерения перепада давления, создаваемого в СУ и шкала которого градуируется в единицах расхода. В этом случае измерительную последовательную цепочку преобразований можно представить в виде:

$$G \rightarrow \text{СУ} \rightarrow \Delta P \rightarrow \text{ВП}(G = k\sqrt{\Delta P}).$$

На тепловых объектах, где информацию об измеряемом расходе необходимо передать на расстояние для использования в системах автоматического управления или защиты, применяются измерительные системы с промежуточными преобразователями типа ДМ, ДМЭР, САПФИР 22, МЕТРАН и т.д., рассмотренные в пятой главе.

Сужающие устройства подразделяются на стандартные и не стандартные. Стандартные СУ – это устройства, изготовленные и установленные в соответствии с руководящим нормативным документом ГОСТ 8.569.1 – 97. Для стандартных СУ градуировочная характеристика  $G = k\sqrt{\Delta P}$  определяется расчетным путем. Для нестандартных СУ градуировочная характеристика определяется в результате индивидуальной градуировки.

При использовании стандартных СУ необходимо выполнить определенных условий:

- диаметр трубопровода должен быть не менее 50 мм;
- характер движения потока до и после СУ должен быть турбулентным;
- поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода;
- фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через СУ;
- во внутренней полости трубопровода до и после СУ не образуются осадки и другие виды загрязнений;
- измерение производится больших расходов незагрязненных однофазных сред;
- наличие прямолинейных участков до и после СУ.

### 6.1.1. Типы стандартных сужающих устройств

В качестве стандартных СУ для измерения расхода жидкостей, газов и пара используются диафрагмы или сопла и значительно реже сопла Вентури [20, 21, 28].

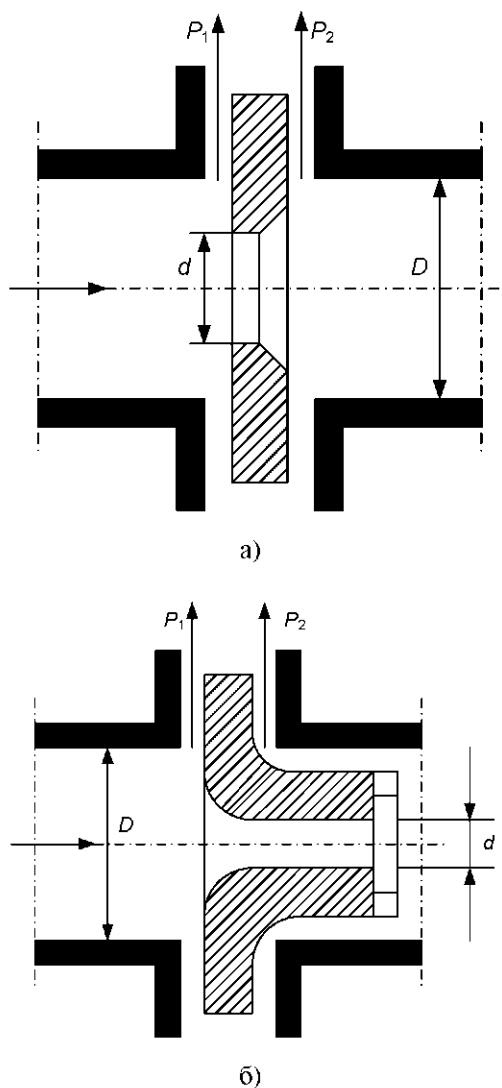


Рис. 6.1. Схема стандартного сужающего устройства:  
а – диафрагма, б – сопло

Диафрагма (рис. 6.1а) представляет собой тонкий диск с круглыми отверстиями посередине диаметром  $d$ , ось которого располагается по оси трубы. Передняя кромка отверстия должна быть острой.

Сопло (рис. 6.1б) имеет спрофилированную входную часть, которая затем переходит в цилиндрический участок диаметром  $d$ . При измерении расхода газа стандартные сопла устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм и при измерении расхода жидкостей на трубопроводах диаметром не менее 30 мм.

### 6.1.2. Уравнение расхода

Вывод уравнения расхода рассмотрим на примере диафрагмы, установленной в горизонтальном трубопроводе с прямолинейными участками до и после СУ. Среда – жидкость – несжимаема (т.е. плотность жидкости не изменяется при прохождении через СУ) и теплообмен с окружающей средой отсутствует. Для этого рассмотрим характер потока (рис. 6.2а) и распределение статического давления (рис. 6.2б) при установке в трубопроводе диафрагмы. Представляют интерес два сечения потока: сечения А и В.

Сечение А характеризуется невозмущенным потоком со скоростью потока  $v_a$ . Далее поток расширяется до сечения С, где происходит выравнивание скоростей  $v_a - v_c$  (рис. 6.2а).

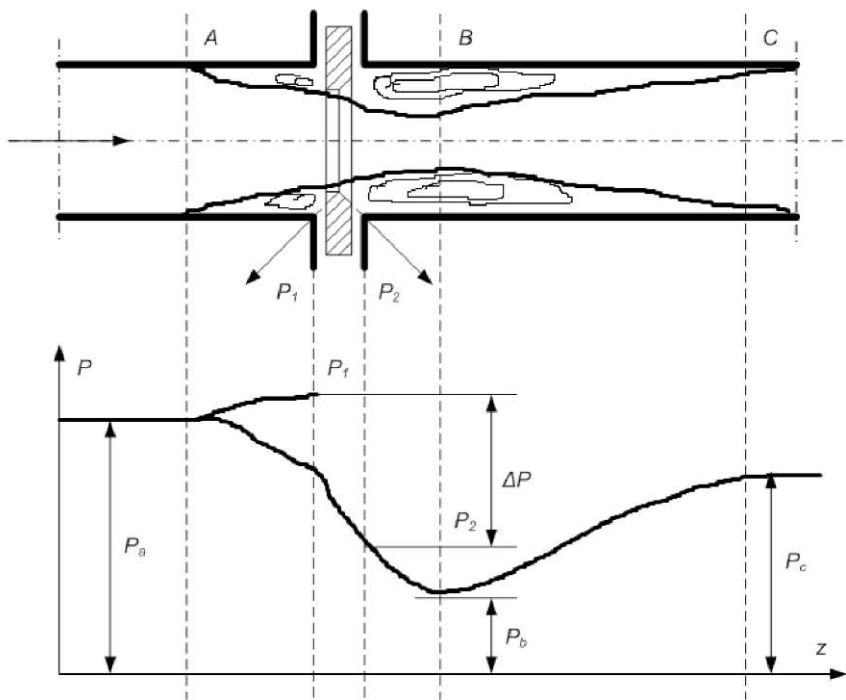
Распределение статического давления вдоль стенки трубопровода (рис. 6.2 б): на участке А–В струя сужается, скорость увеличивается, а давление падает от  $P_a$  до  $P_b$  (самое узкое сечение – теоретическое). На участке В–С давление растет, скорость потока уменьшается, но  $P_b \neq P_c$  (из-за потерь). Потери давления происходят из-за вихреобразования в мертвых зонах, а также за счет небольшого повышения температуры при столкновении потока с диафрагмой (это сопровождается небольшим ростом давления у кромки диафрагмы).

$$P_a = P_c + P_n,$$

где  $P_n$  – безвозвратная потеря движения.

Для определения зависимости между расходом  $G$  и перепадом давления  $\Delta P = P_1 - P_2$ , где  $P_1$  – давление до, а  $P_2$  – после сужающего устройства, обратимся к тем предположениям, которые указаны выше.

Для неразрывной струи несжимаемой среды плотностью  $\rho$ , движущейся по трубопроводу сечением  $F$  со скоростью  $v$ , массовый расход можно выразить формулой  $G_m = \rho v F$ .



**Рис. 6.2. Характер потока (а) и распределение статического давления вдоль стенки трубопровода (б)**

Из условия неразрывности можно записать уравнение сохранения постоянства массового расхода для сечения А – А и на выходе диафрагмы:

$$\rho v_D \pi D^2 / 4 = \rho v_d \pi d^2 / 4; \quad (6.1)$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры трубопровода и СУ;  $v_D$  и  $v_d$  – соответственно скорости потока в трубопроводе и в отверстии СУ.

Закон сохранения энергии для потока в трубопроводе для этих же сечений, представленный уравнением Бернулли, имеет вид:

$$P_1 + \rho v_D^2 / 2 = P_2 + \rho v_d^2 / 2. \quad (6.2)$$



Введем понятие *относительный диаметр* по ГОСТ 8569.2-97:  $\beta=d/D$  (ранее отношение  $d^2/D^2$  называлось относительной площадью или модулем СУ).

Из уравнения (6.1) с учетом введенного понятия  $\beta$ :

$$v_{13}=v_d \beta^2. \quad (6.3)$$

Подставив выражение (6.3) в уравнение (6.2), решаем его относительно  $v_d$  и, принимая во внимание, согласно ГОСТ 8569.2-97, что:

$E$  – коэффициент расхода входа равен величине  $1/(1-\beta^4)^{-0.5}$ ;

$C$  – коэффициент истечения, учитывающий завывшение  $\Delta P$ , вызванное торможением потока и завихрениями на входе и выходе из СУ ( $C<1$ ), получаем расчетные формулы уравнения расхода для несжимаемых сред:

$$G_M = CEf\sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}; \quad (6.4)$$

$$G_O = CEf\sqrt{2(P_1 - P_2/\rho)}, \quad (6.5)$$

где:  $f$  – минимальная площадь проходного сечения СУ (произведение  $CE$  ранее было представлено, как коэффициент расхода  $\alpha$ ).

Введение коэффициентов  $E$  и  $C$  приближает результаты, выполненные по расчетным формулам (6.4) и (6.5) к теоретическим. Отклонение последних обусловлено условиями технической реализации теоретических зависимостей, а именно: коэффициент  $E$  учитывает смещение отборов давления до и после СУ от теоретических (сечение А и сечение В) в точки технически реализуемые у кромок СУ до и после. Коэффициент  $C$ , который меньше единицы, учитывает потери давления в мертвых зонах и на незначительное повышение температуры при торможении потока у СУ.

Для расчета СУ по ГОСТ 8569.2-97 используются компьютерные программы, в которых, экспериментально полученные значения коэффициентов  $C$  и  $E$  описаны математически.

Для газовых сред, в представленные выше уравнения расхода, вводится коэффициент  $\varepsilon$ , учитывающий расширение среды при прохождении через СУ:

$$G_M = CEf\varepsilon\sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}; \quad (6.6)$$

$$G_O = CEf\varepsilon\sqrt{2(P_1 - P_2/\rho)}; \quad (6.7)$$

Для жидкости коэффициент  $\varepsilon = 1$ , а для газа  $\varepsilon < 1$ .

Представленные формулы являются основными уравнениями расхода для расходомеров с сужающими устройствами. Использование этих формул предполагает, что  $\rho$ ,  $C$ ,  $K$ ,  $\varepsilon$  и  $f$  не должны зависеть от расхода т.е., постоянны. Тогда уравнения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} G_M &= k_M \sqrt{\Delta P}; \\ G_0 &= k_0 \sqrt{\Delta P}, \end{aligned} \tag{6.8}$$

где:  $k_M$  и  $k_0$  – постоянные коэффициенты.

Между расходом и перепадом давления в СУ существует определенная квадратичная зависимость и поэтому для расходомеров, шкалы которых градуируются в единицах расхода, в кинематическую или электронную схему дифманометров или вторичных приборов включаются различные типы устройств (или программные модули), извлекающих квадратный корень. Наличие таких устройств является одним из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления.

Другим серьезным недостатком метода является суженный диапазон измерения, охватывающий обычно интервал 30...100% максимального измеряемого расхода. Это означает, что использовать расходомер для измерения расхода в интервале 0...30% его шкалы не рекомендуется, так как не гарантируется точность измерения из-за резкого увеличения относительной погрешности измерения перепада давления.

В реальных условиях эксплуатации, при изменении температуры и давления газа, меняется плотность среды, что влияет на коэффициенты  $k_M$  и  $k_0$  и градуировочную характеристику. В этом случае вводится поправка на плотность расчетным путем. При значительных и частых колебаниях плотности обычно применяются расходомеры с автоматическим введением поправки на плотность [20,21,28].

Большинство выпускаемых в настоящее время расходомеров являются микропроцессорными приборами с широкими функциональными возможностями: хранения суточных и месячных расходов веществ в течение 1–3 лет, подключение ПК и принтеров, соединение с локальными компьютерными сетями и т.д.

### *6.1.3. Особенности измерения расхода пара*

При измерении расхода перегретого пара неизолрированные соединительные линии оказываются заполненными конденсатом [29-31].

Очевидно, что во избежание дополнительной погрешности уровень конденсата и его температура в обеих линиях должны быть одинаковыми при любом расходе.

Для стабилизации верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях вблизи СУ устанавливаются уравнильные конденсационные сосуды, имеющие диаметры, значительно большие, чем импульсные соединительные линии. Это вызвано тем, что чувствительный элемент дифманометра – мембранный блок – состоит из двух мембранных коробок, расположенных в «минусовой» и плюсовой» камерах, соединенных с импульсными линиями, которые при изменении перепада давления изменяют свои объемы и этим изменяют уровни конденсата в импульсных линиях. Так как сечение конденсационных сосудов велико, вытекание их конденсата мало изменит его уровень, так что перепад давления, измеряемый дифманометром, можно считать равным перепаду давления в СУ.

Применение конденсационных сосудов при измерении расхода пара обусловлено и технологической необходимостью, чтобы избежать заброса конденсата в паропровод.

### *6.1.4. Оценка погрешности измерения расхода*

Приведенные выше уравнения расхода показывают, что значение расхода является результатом косвенных измерений. Для относительной среднеквадратической погрешности расхода справедлива следующая формула [20, 21, 28]:

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 + 0.25\sigma_p^2 + \sigma_d} \quad (6.9)$$

При изготовлении СУ принимаются очень малые значения допусков на диаметр отверстия  $d$ , в силу чего  $\sigma_d$  оказываются пренебрежимо малой по сравнению с остальными слагаемыми и

её можно исключить. Самая весомая часть этой суммарной погрешности является среднеквадратическая погрешность измерения перепада давления  $\sigma_{\sqrt{\Delta P}}$ . Перепад давления может измеряться, как одним измерительным преобразователем с нормированным выходным сигналом постоянного тока, так и ИС, имеющей, как минимум, два прибора. Точность приборов нормируется предельными погрешностями в виде класса точности и, чтобы оперировать среднеквадратическими погрешностями, принимаем, что она равна половине максимальной (предполагается нормальный закон распределения отдельных погрешностей при выбранной доверительной вероятности 0,95).

Рассмотрев самый широко применяемый метод измерения расхода, следует отметить следующие основные достоинства его:

- СУ – простые и надежные средства измерения расхода;
- СУ – универсальны, они могут применяться для измерения расхода практически однофазных сред в широком диапазоне давлений, температур, расходов и диаметров трубопровода;
- градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств может быть определена расчетным путем, поэтому отпадает необходимость в образцовых расходомерных установках;
- возможность использования для различных условий измерения однотипных но устройству дифманометров и вторичных приборов; индивидуальным для каждого расходомера является только сужающее устройство.

Наряду с достоинствами расходомеры с сужающими устройствами имеют и недостатки. Отметим наиболее важные:

- нелинейная зависимость между расходом и перепадом, что не позволяет измерять расходы менее 0,3 верхнего предельного расхода из-за высокой погрешности измерения;
- необходимость индивидуальной градуировки сужающих устройств, для измерения расходов при малых числах Рейнольдса  $Re$  или в трубах малого диаметра;
- расходомеры с СУ имеют ограниченную точность, причем погрешность измерения колеблется в широких пределах (1,5–3%) в зависимости от состояния СУ, диаметра трубопровода, непостоянства давления и температуры измеряемой среды;

- ограниченное быстроедействие (инерционность) из-за наличия данных импульсных трубок и в связи с этим трудности при измерении быстроменяющихся расходов.

Однако, в настоящее время указанные недостатки сводятся к минимуму благодаря широкому применению микропроцессорных устройств, как в промежуточных преобразователях, так и во вторичных приборах.

## 6.2. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры

Далее рассмотрим расходомеры постоянного перепада давления. Область применения и особенности данного метода перечислены ниже [20, 21, 28]:

- измерение малых объемных расходов жидкостей и газов в вертикальных трубопроводах диаметром 4–100 мм;
- практически линейная шкала;
- малая остаточная потеря давления;
- верхние пределы измерения ротаметров по воде от 0,04 до 16 м<sup>3</sup>/ч, а по воздуху от 0,063 до 40 м<sup>3</sup>/ч;
- невысокий класс точности ротаметров общепромышленного назначения [20, 21, 28];
- минимальный измеряемый расход равен обычно 0,2 верхнего предела измеряемого давления ( $G_{в.н.}$ ).

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1, внутри которой располагается поплавков 2 (рис. 6.3).

Поплавков имеет цилиндрическую форму с нижней конической частью и верхний бортик с вырезанными на нем косыми канавками. Канавки обеспечивают вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется его трение о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой засор  $f_k$ , при прохождении через который жидкость сужается и, таким образом возникает разность между давлением  $P_1$  в сечении А – А до начала сужения и давлением  $P_2$  в самом узком сечении В – В кольцевой струи. С подъемом поплавка площадь  $f_k$  увеличивается, что в случае неизменного расхода приводит к уменьшению разности  $P_1 - P_2$ .

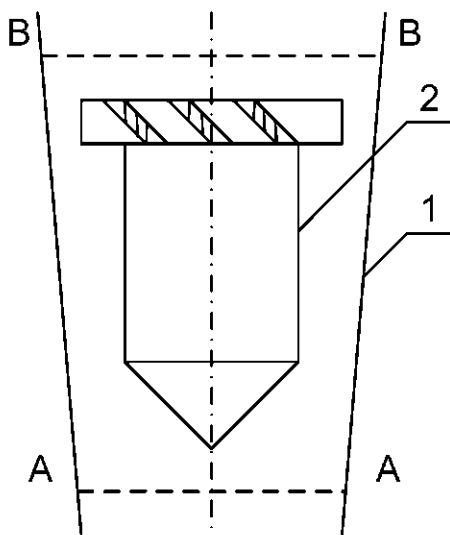


Рис. 6.3. Схема ротаметра

Принцип действия ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими на него со стороны жидкости. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

В момент измерения, при неподвижном поплавке:

$$F_n = F_m, \quad (6.10)$$

где  $F_n$  – сила, обусловленная разностью статических давлений  $P_1 - P_2$ , возникающая вследствие ускорения потока в кольцевом зазоре между стенкой и поплавком и действующая снизу вверх:

$$F_n = (P_1 - P_2) f_k$$

$F_m$  – сила тяжести поплавка, действующая сверху вниз:

$$F_m = V \rho_n \cdot g, \rho_n$$

где  $V$  – объем поплавка,  $\rho_n$  – средняя плотность поплавка,  $g$  – ускорение свободного падения.

Из уравнения (6.10) следует:  $P_1 - P_2 = F_m / f_k$ , т.е. перепад давления на поплавке оказывается не зависящим от расхода. Поэтому ротаметры относятся к группе расходомеров постоянного перепада.

Обычно в ротаметрах типа РМ используется стеклянные конические трубы, на наружной поверхности которых нанесена шкала. Указателем служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка. Такие приборы применяются для измерения расхода прозрачных жидкостей и газов, находящихся под давлением не более 0,6 МПа.

Для измерения расхода сред под избыточным давлением до 6,4 МПа используются ротаметры с металлической конической трубкой. Такие ротаметры снабжаются преобразователями для дистанционной передачи показаний.

Материал поплавков: сталь, алюминий, бронза, эбонит, пластмассы, которые не должны подвергаться коррозии в контролируемой среде.

Недостатками ротаметров являются необходимость их установки только на вертикальных участках трубопроводов; трудности дистанционной передачи показаний и записи; непригодность для измерения расхода сред с высокими давлением и температурой.

### 6.3. Электромагнитные (индукционные) расходомеры

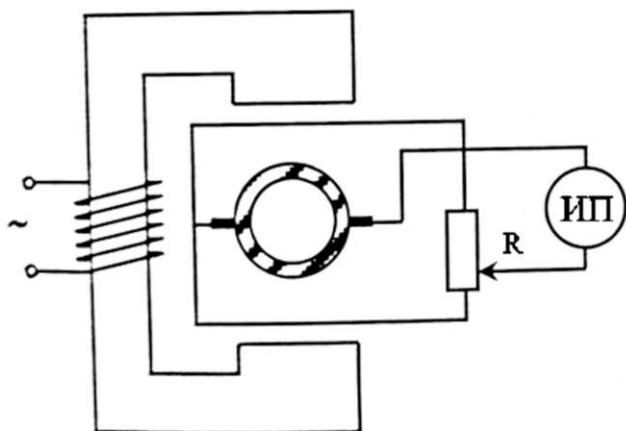
Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии, с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.

Область применения и характерные черты электромагнитных расходомеров перечислены ниже:

- измерение расхода жидкостей с электропроводностью не менее  $10^{-3}$  См/м (соответствует электропроводности водопроводной воды)
- измерение расхода загрязненных, агрессивных и вязких жидкостей и пульп, измерение расхода жидких металлов;
- нет ограничений по диаметрам трубопровода (от 2 до 4000 мм);
- отсутствует остаточная потеря давления, т.к. нет выступающих частей, изменяющих поток среды;
- измерение расхода не зависит от плотности среды.

Существенным недостатком этого метода является низкая помехоустойчивость, при низком уровне информационного сигнала (мкВ)

Различают расходомеры с датчиками, использующими постоянное магнитное поле или переменное. На рисунке 6.4 представлена схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем. Корпус преобразователя, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией, расположен между полюсами магнита. Через стенку трубопровода изолированно от нее по диаметру введены электроды, находящиеся в электрическом контакте в жидкостью. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубопровода и линию электродов.



**Рис. 6.4. Схема преобразователя электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем**

В соответствии с законом электромагнитной индукции, при осесимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами наводиться ЭДС

$$E = BDv, \quad (6.11)$$

где:  $B$  – индукция магнитного поля;  $v$  – средняя скорость жидкости;  $D$  – длина жидкостного проводника, равная диаметру трубопровода.



Учитывая, что  $G_0 = \pi D^2/4$ , получаем  $E = 4BG_0/(\pi D)$ .

Отсюда следует, что ЭДС  $E$  прямо пропорциональна измеряемому объективному расходу. Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным прибором ИП, к которому предъявляются жесткие требования по значению его входного сопротивления  $Z_{в}$ . Для обеспечения малого влияния внутреннего сопротивления преобразователя  $Z_{н}$  необходимо выполнение соотношения:  $Z_{в}/Z_{н}=100 \div 500$ .

Применение постоянных магнитов в расходомерах позволяет облегчить борьбу с помехами от внешних электромагнитных полей, увеличить быстродействие прибора. Основным недостатком их использования является поляризация электродов: концентрация у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного положительных. Вследствие этого на границах электродов создаются ЭДС, которые в сумме образуют ЭДС поляризации, направленную против основной ЭДС, что изменяет градуировочную характеристику прибора и делает невозможной его стабильную работу. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем не применяются для жидкостей с ионной проводимостью. Широкое распространение они получили для измерения расхода жидких металлов, в которых отсутствует явление поляризации [20, 21, 28].

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом. При достаточно высокой частоте  $\gamma$  поляризация электродов практически отсутствует, однако использование переменного магнитного поля имеет свои недостатки. Измерение расхода, в этом случае, сопровождается следующими помехами:

- паразитные наводки от внешних электрических цепей;
- электростатические емкостные помехи от сети переменного тока;
- трансформаторная помеха от магнитного поля датчика.

Первые две помехи можно уменьшить путем экранирования датчика при установке. Наиболее серьезным недостатком является появление паразитной трансформаторной ЭДС –  $E_{т}$ . Эта ЭДС наводится рабочим магнитным полем в контуре провод – электрод – жидкость- электрод- провод– вход измерительного прибора ИП.

Обычно для ослабления влияния  $E_T$  используется схема рис. 6.4. В этой схеме от одного из электродов отходят два провода, симметрично охватывающих трубопровод с обеих сторон и замыкающихся на резистор  $R$ . Измерительный прибор подключается к движку этого резистора и ко второму электроду. При нулевом расходе перемещением движка необходимо добиться минимального сигнала на входе измерительного прибора, но  $E_T$  полностью не устраняют.

В современных расходомерах для полного  $E_T$  используется сдвиг по фазе на  $90^\circ$  между  $E_T$  и  $E_T$ . В этом случае измерительная схема содержит два канала, один из которых предназначен для измерения полезного сигнала, второй – для компенсации трансформаторной ЭДС.

Электромагнитный расходомер – это комплект, состоящий из датчика (установленного на трубопроводе), измерительного преобразователя (установленного по месту) и вторичного прибора (установленного на местном или блочном щите управления).

В настоящее время отечественными и зарубежными фирмами выпускается широкий спектр микропроцессорных электромагнитных расходомеров: МР400 (фирма «Взлет»), ИПРЭ-1 (Арзамасский приборостроительный завод), РМ-5 (ф. «ТБН»), РОСТ 13, ТРЭМ-ПР (завод «Молния»), ВИСТ (фирма «Тепловизор»), РСМ-05 (фирма «ТЭМ-прибор»). Эти приборы помимо цифровых показаний и токового выходного сигнала могут иметь импульсный выход и интерфейсы RS-232 и RS-485. В перечисленных средствах, кроме сервисных функций, выполняются на самом высоком уровне функции защиты и коррекции информации об измеряемом расходе.

Электромагнитные расходомеры могут быть использованы в ряде случаев, когда применение расходомеров других типов затруднено или невозможно вовсе: при измерении расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп, измерение расхода жидких металлов.

Класс точности этих расходомеров невелик 1 и 1,5.

Шестая глава данного пособия была посвящена измерению расхода. Сначала рассматривались общие вопросы измерения расхода, виды расхода (объемный, массовый), единицы измерения расхода и т.д. Далее изучались одни из самых популярных в теп-

лоэнергетике расходомеров – расходомеры переменного перепада давления. Сначала рассматривались сужающие устройства (сопла и диафрагмы), затем – теоретические вопросы измерения расхода по перепаду давления на сужающем устройстве, методы измерения расхода и оценка погрешности измерения. Затем изучались расходомеры постоянного перепада давления на примере ротаметров и электромагнитных расходомеров.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. В каких единицах измеряется объемный расход? Массовый расход?
2. Каким образом можно вычислить массовый расход среды, если известен её объемный расход?
3. Какие существуют разновидности расходомеров?
4. Какова зависимость расхода от перепада давления на сужающем устройстве?
5. Какие существуют стандартные сужающие устройства?
6. В каких случаях можно применять стандартные сужающие устройства?
7. Как влияет на расход площадь проходного сечения сужающего устройства?
8. Как рассчитать погрешность измерения расхода по перепаду на сужающем устройстве?
9. В каких случаях используются конденсационные сосуды?
10. Начертите структурную схему ротаметра, укажите его основные элементы.
11. Каков принцип действия ротаметра?
12. Из каких материалов изготавливают поплавки ротаметра?
13. Можно ли применять ротаметры на горизонтальных участках трубопроводов? Обоснуйте свой ответ.
14. Каков принцип действия электромагнитных расходомеров?

## Глава 7. ТЕПЛОСЧЕТЧИКИ

### 7.1. Общие положения

Измерение расхода и количества теплоты играет важную роль при автоматизации систем теплоснабжения и построении систем коммерческого учета энергии. Прибор, измеряющий количество теплоты, перенесенной теплоносителем в единицу времени, называется теплометром.

Прибор, измеряющий количество теплоты, перенесенной теплоносителем за некоторый промежуток времени, называется теплосчетчиком.

Таким образом, теплосчетчик – это средство измерения, предназначенное для определения количества теплоты [20, 21, 28]. В системе СИ количество теплоты измеряется в Дж (джоулях), в России наряду с джоулями часто применяется внесистемная единица кал (калория), при переводе из одних единиц в другие пользуются соотношением  $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$ . На практике обычно применяют гигаджоули (ГДж) или гигакалории (Гкал).

С помощью теплосчетчиков учитывают количество теплоты, полученное потребителем (если теплосчетчик установлен у потребителя) или отпущенное потребителю (если прибор установлен в источнике теплоты). Таким образом, теплосчетчики используются в системах теплоснабжения, горячего водоснабжения, в узлах коммерческого учета тепловой энергии и т.д. Ими укомплектованы ТЭЦ, РТС, котельные, а также потребители – общественные здания и сооружения и жилые дома. На основании показаний теплосчетчиков происходит расчет за тепловую энергию. В силу такой связи теплосчетчиков с финансовыми вопросами, к этим устройствам предъявляются высокие требования в плане обеспечения точности измерений.

Измеренное теплосчетчиком количество теплоты представляет собой результат косвенного измерения, так как вычисляется на основании результатов прямых измерений температуры, давления и расхода теплоносителей в прямом и обратном трубопроводах. Соотношения, по которым выполняют расчеты, зависят от вида системы отпуска теплоты (открытая или закрытая) и от вида теплоносителя (вода или пар).

## 7.2. Состав теплосчетчиков

Современные теплосчетчики – это многофункциональные микропроцессорные приборы, оснащенные специализированным программным обеспечением и имеющие защиту от несанкционированного доступа.

Теплосчетчик обычно состоит из перечисленных ниже модулей:

- электронный блок (тепловычислитель);
- расходомер;
- комплект преобразователей температуры;
- комплект преобразователей давления.

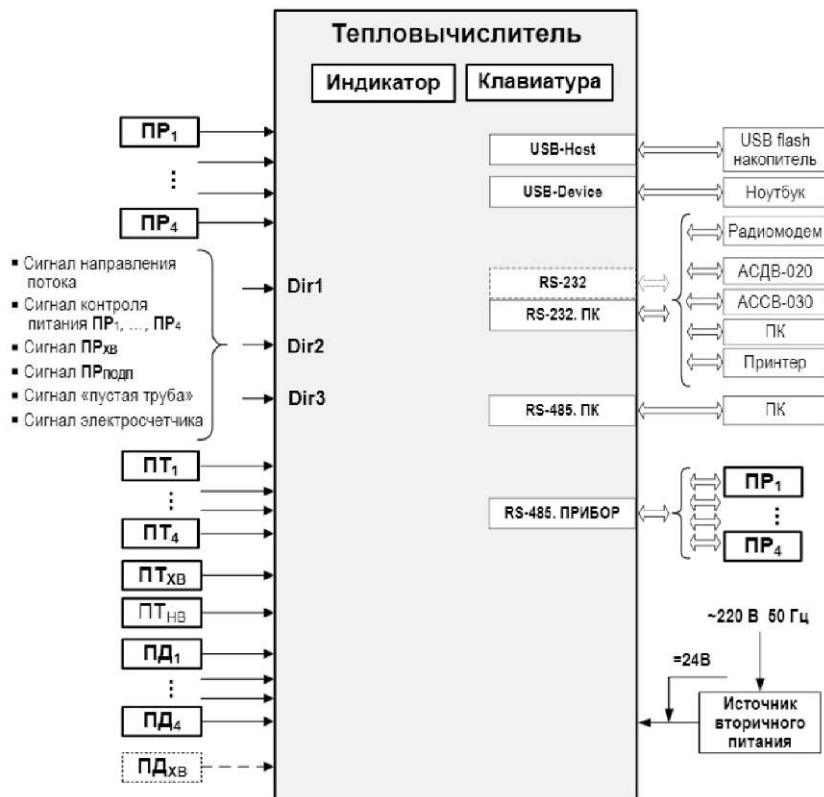
Расходомер, входящий в состав теплосчетчика, может быть электромагнитным, ультразвуковым, вихревым или тахометрическим [44, 45, 51]. Средства измерения расхода уже рассматривались ранее в данном пособии в главе 6. В качестве преобразователей температуры обычно используются медные или платиновые термометры сопротивления (смотри главу 4). К современным теплосчетчикам термометры сопротивления подключаются, как правило, по четырехпроводной схеме. В состав теплосчетчиков могут входить преобразователи, измеряющие как абсолютное, так и избыточное давление (смотри главу 5).

Кроме перечисленных выше, к тепловычислителю могут подключаться и другие устройства, например, счетчик электроэнергии, принтер, считыватель данных [44, 45].

Рассмотрим более подробно состав тепловычислителя (электронного блока) на примере теплосчетчика «Взлет ТСП-М» производства фирмы «Взлет» [44]. Структурная схема представлена на рис. 7.1.

Тепловычислитель – микропроцессорное устройство, оснащенное жидкокристаллическим индикатором, клавиатурой (для рассматриваемого теплосчетчика – из шести кнопок), разъемами для подключения измерительных преобразователей давления, температуры и расхода и интерфейсными портами. Как видно из рис. 7.1, тепловычислитель оснащен USB-портами для подключения USB флеш-накопителя и ноутбука, а также интерфейсными портами RS-232 и RS-485; таким образом возможно подключение

к теплосчетчику персонального компьютера. Также к интерфейсным портам RS-485 могут подключаться преобразователи расхода. Кроме того, к блоку тепловычислителя возможно подключение компьютера, принтера и радиомодема.



**Рис. 7.1. Структурная схема теплосчетчика «Взлет ТСР-М»:**

ПТ<sub>*i*</sub> – преобразователь температуры, ПД<sub>*i*</sub> – преобразователь давления,  
 ПР<sub>*i*</sub> – преобразователь расхода, Dir<sub>*i*</sub> – универсальный вход,  
 ПК – персональный компьютер, НВ – наружный воздух, ХВ – холодная вода, ПОДП – подпитка

К интерфейсным портам RS-232 также подключается устройство, обозначенное на рис. 7.1 как АСДВ. Это архивный считыватель данных, предназначенный для сбора архивной информации с теплосчетчика, при необходимости эта информация с АСДВ может быть передана на персональный компьютер [45].

Кроме того, архивный считыватель может выполнять ряд других функций, например, определять объем свободной памяти, необходимой для записи архивных данных, контролировать процесс записи данных, возобновлять запись данных после прерывания с того же места и т.д. [45].

АССВ-030, также подключаемый к интерфейсным входам RS-232 – это адаптер сотовой связи, посредством которого теплосчетчик может подключиться, например, к беспроводной системе учета и диспетчеризации. Адаптер обеспечивает удаленный доступ к теплосчетчику в режиме реального времени.

Многие современные теплосчетчики могут обслуживать несколько теплосистем, например, ВИС.Т – до трех систем произвольной конфигурации, т.е., фактически, прибор представляет собой три теплосчетчика в одном комплекте.

При архивировании данных в память тепловычислителя заносятся параметры теплоносителей, результаты вычисления количества теплоты, а также диагностическая информация о работе прибора. В случае, если теплосчетчик обслуживает несколько теплосистем, архив параметров ведется для каждой теплосистемы отдельно. Архив пополняется через определенные промежутки времени, например, для теплосчетчиков ВИС.Т – один раз в час, объем почасового архива составляет до трех месяцев [45]. Информацию из архива можно вывести на принтер, на компьютер или записать в память архивного считывателя данных.

### **7.3. Способы подключения теплосчетчиков и алгоритмы расчета количества теплоты**

Способы подключения теплосчетчиков и алгоритмы расчета количества теплоты зависят от того, где установлен теплосчетчик (в источнике или в приемнике тепла), что является теплоносителем (вода, водяной пар, другие среды), какова схема системы теплоснабжения – открытая или закрытая.

На рисунок 7.2 изображен теплосчетчик, работающий в закрытой системе теплоснабжения, что означает, что расход теплоносителя не изменяется, так как отсутствует водоразбор. В данном случае количество теплоты, отданной потребителю за интервал времени  $[T_1, T_2]$  можно вычислить по формуле [20, 21, 28, 44, 45, 51, 32]:

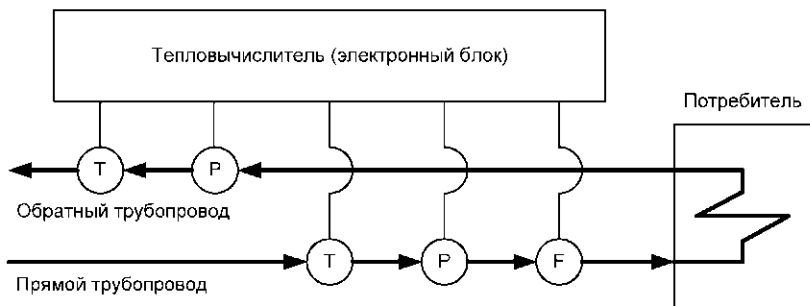
$$Q = \int_{T_1}^{T_2} G_T (h_{\text{прям}} - h_{\text{обр}}) dt,$$

где  $Q$  – количество теплоты, отданной потребителю;  $G_T$  – массовый расход теплоносителя;  $h_{\text{прям}}$  – энтальпия теплоносителя в прямом трубопроводе системы теплоснабжения,  $h_{\text{обр}}$  – энтальпия теплоносителя в обратном трубопроводе системы теплоснабжения,  $t$  – время.

Если теплосчетчик работает в открытой системе теплоснабжения, то алгоритм расчета количества теплоты, отданного водяным теплоносителем, зависит от ряда факторов. На рисунке 6.3 показан теплосчетчик, установленный в открытой системе теплоснабжения в источнике теплоты. Как видно из рисунка, в данном случае измеряется расход теплоносителя и в прямом, и в обратном трубопроводах. Для расчета отпущенного потребителю количества теплоты можно применять, например, следующее соотношение [20, 21, 28, 32, 44, 45, 51]:

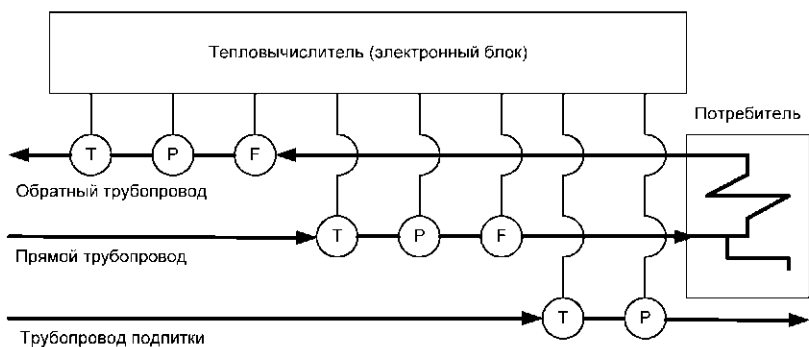
$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [G_{\text{прям}}(h_{\text{прям}} - h_{\text{обр}}) - (G_{\text{прям}} - G_{\text{обр}})(h_{\text{обр}} - h_{\text{подп}})] dt;$$

где:  $G_{\text{прям}}$  – массовый расход теплоносителя в прямом трубопроводе;  $G_{\text{обр}}$  – массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе;  $h_{\text{подп}}$  – энтальпия воды в трубопроводе подпитки.



**Рис. 7.2. Теплосчетчик в закрытой системе теплоснабжения:**  
*T* – преобразователи температуры, *P* – преобразователи давления,  
*F* – преобразователь расхода





**Рис. 7.3. Теплосчетчик в открытой системе теплоснабжения, установленный в источнике теплоты:**

*P* – преобразователи давления; *F* – преобразователь расхода

Существуют и другие соотношения для расчета количества теплоты, например, основанные на расходе теплоносителя в трубопроводе обратной воды. Также существуют соотношения для того случая, когда в качестве теплоносителя используется водяной пар [20, 21, 28, 32, 44, 45, 51]:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [D_{\text{пар}}(h_{\text{пар}} - h_{\text{конд}}) + (D_{\text{пар}} - G_{\text{конд}})(h_{\text{конд}} - h_{\text{подп}})] dt;$$

где  $D_{\text{пар}}$  и  $h_{\text{пар}}$  – расход и энтальпия пара;  $G_{\text{конд}}$  и  $h_{\text{конд}}$  – расход и энтальпия возвращенного конденсата.

Как упоминалось выше, и как видно из приведенных в данном параграфе формул, для расчета количества теплоты необходимы измерения расхода, температуры и давления теплоносителя, результаты расчета по формулам суммируются во времени, т.е., количество теплоты представляет собой результат косвенного измерения.

Погрешность косвенного измерения зависит от следующих факторов:

- погрешностей первичных средств измерения давления, расхода или разности расходов, разности температур;
- алгоритма расчета количества теплоты;
- погрешности тепловычислителя, в которую входят инструментальная погрешность и погрешности расчетных соотношений, аппроксимирующих теплофизические свойства воды и водяного пара.

Погрешность электронного блока при расчете количества теплоты обычно составляет от  $\pm 0,1$  до  $\pm 0,25\%$ .

Также точность теплосчетчиков зависит от измеряемой разности температур. Например, если  $\Delta t = 3 \pm 10^\circ\text{C}$ , то погрешность составляет  $\delta = \pm 6\%$ ; если  $\Delta t = 10 \pm 20^\circ\text{C}$ , то  $\delta = \pm 5\%$ ; а если  $\Delta t > 20^\circ\text{C}$ , то  $\delta = \pm 4\%$ , т.е., с увеличением измеряемой разности температур погрешность падает.

Седьмая глава учебника посвящена теплосчетчикам и вопросам измерения количества теплоты. Сначала рассматривались теоретические вопросы, касающиеся теплосчетчиков, затем – устройство теплосчетчика и более подробно – устройство и функции тепловычислителя. Далее изучались алгоритмы расчета количества теплоты и способы подключения теплосчетчиков в различных системах теплоснабжения (например, открытой и закрытой). Здесь в заключении необходимо отметить, что современный теплосчетчик является сложным микропроцессорным устройством и может рассматриваться как интеллектуальный прибор (интеллектуальный датчик) и работать в одной сети с контроллерами, панелями оператора и т.д.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. В каких единицах системы СИ измеряется количество теплоты? Какие внесистемные единицы употребляются в России? Как пересчитать количество теплоты из одних единиц в другие?

2. Какова структурная схема теплосчетчика? Какие основные элементы входят в его состав?

3. По какой схеме к тепловычислителю подключаются термометры сопротивления?

4. Какие внешние устройства можно подключить к тепловычислителю? С какой целью?

5. По какому алгоритму рассчитывается количество полученной теплоты в закрытой системе теплоснабжения?

6. По какому алгоритму рассчитывается количество полученной теплоты, если теплоносителем является пар?

7. От чего зависит погрешность теплосчетчика?

## Глава 8. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Важную роль при автоматизации технологических (и, в частности, тепловых) процессов играет измерение уровня жидкостей, например, конденсата в корпусе ПВД, воды в барабане котла и т.д. В принципе, измерить возможно не только уровень жидкости, но и уровень каких-то сыпучих тел, например, уровень угля в угольном бункере. Приборы для измерения уровня – уровнемеры – широко применяются на тепловых и атомных электрических станциях, в котельных, в различных отраслях промышленного производства [20, 21, 28].

В зависимости от своего предназначения уровнемер может иметь одностороннюю или двухстороннюю шкалу. Двухстороннюю шкалу имеют приборы для контроля за отклонением уровня от номинального значения. Односторонней шкалой снабжаются уровнемеры, предназначенные для определения количества вещества в емкости. Также существуют уровнемеры, сигнализирующие о достижении уровнем определенного значения (например, верхнего или нижнего).

Существуют различные методы измерения уровня. Если дистанционная передача показаний не требуется, то уровень можно измерять прибором с визуальным отсчетом (самым простым бытовым примером является контроль уровня в бытовом электрическом чайнике по водомерному стеклу или по положению поплавка). Пример уровнемера с визуальным отсчетом показаний представлен на рис. 8.1.

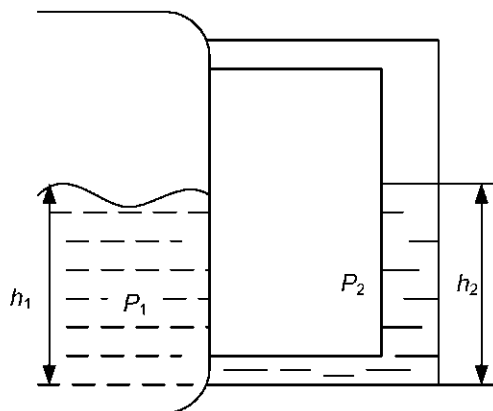


Рис. 8.1. Схема уровнемера с визуальным отсчетом показаний

Если необходима дистанционная передача показаний, то применяются более сложные устройства, например, дифманометрические или ёмкостные уровнемеры. Рассмотрим их ниже.

## 8.1. Дифманометрические уровнемеры

Дифманометрические уровнемеры - это технические средства, где контролируемый уровень пропорционален разности гидростатических давлений  $\Delta P = P_1 - P_2$ , которая измеряется дифманометром.

Гидростатическое давление - это давление, создаваемое столбом жидкости высотой  $H$  рассчитываемое по формуле:

$$P = \rho \cdot g \cdot H,$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения.

На рисунке 8.2 и рис. 8.3 представлены схемы подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением. Импульсные трубки дифманометра заполняются контролируемой жидкостью. Дифманометр измеряет разность давлений  $P_1$  и  $P_2$ , действующих на его чувствительный элемент (мембранный блок). Для схемы, показанной на рис. 8.2, можно записать следующие соотношения:

$$P_1 - (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g,$$

$$P_2 - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g.$$

Если  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , а  $h_1 = h_2$ , то

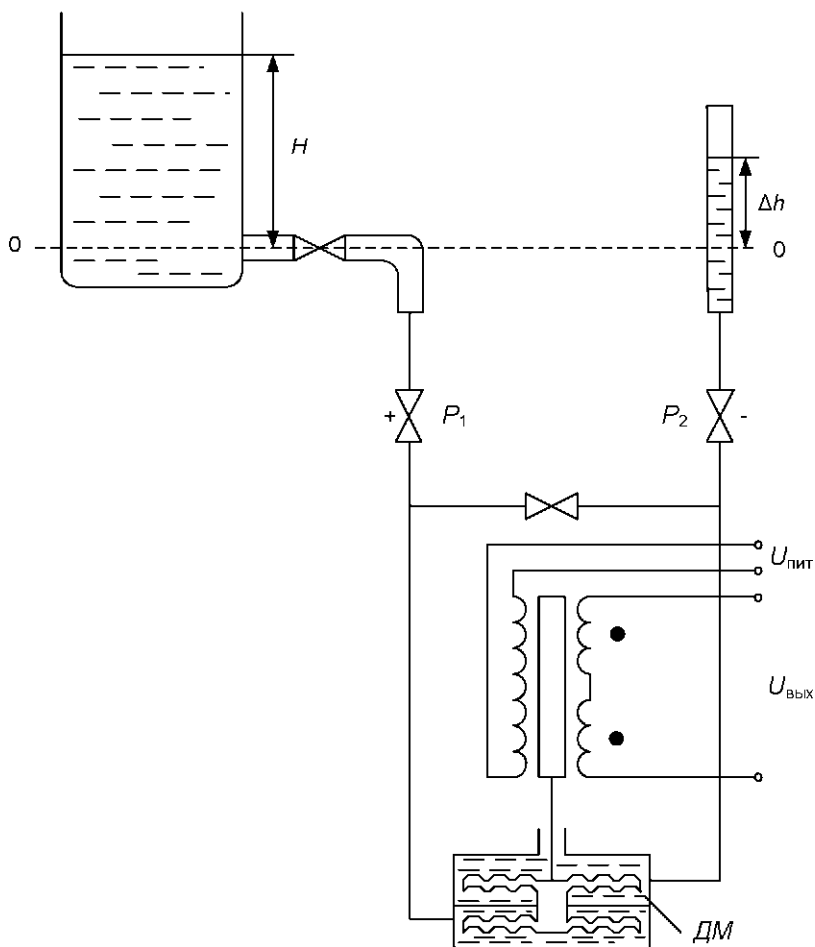
$$P_1 - P_2 - \Delta P = \rho \cdot g \cdot H, \quad (8.1)$$

т.е. при постоянных  $\rho$  и  $g$  измеряемый перепад давления пропорционален уровню. Показания дифманометрического уровнемера будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды.

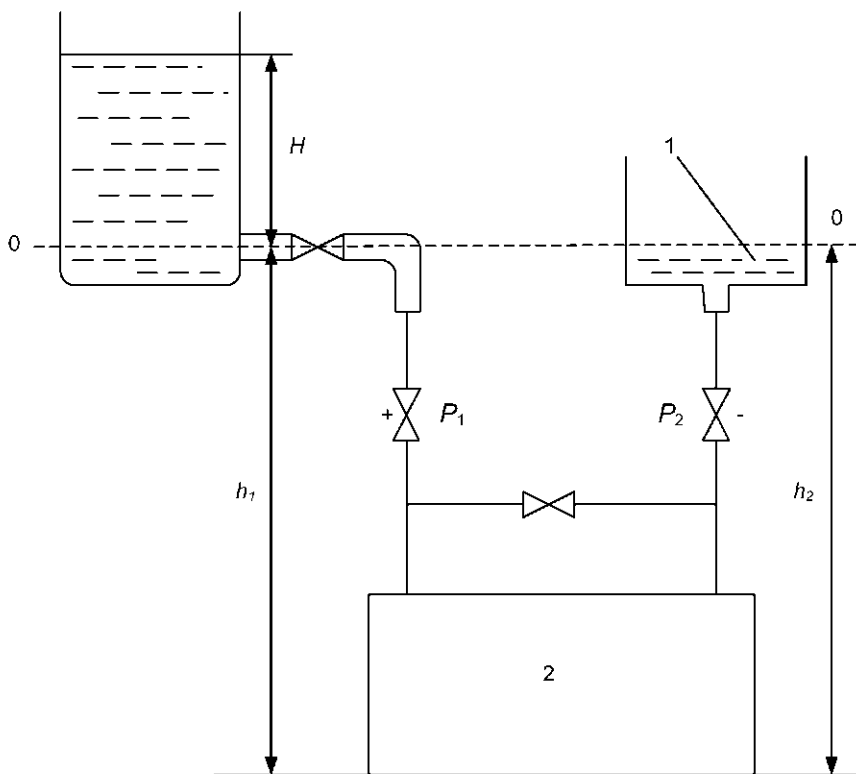
Формула (8.1) справедлива только в том случае, если уровень жидкости в «минусовой» импульсной трубке (обозначается знаком «-») будет неизменным при изменении контролируемого уровня  $H$ .

Для обеспечения этого условия, на этой импульсной трубке, устанавливается уравнительный сосуд (рис. 8.3). Пусть  $H$  увеличивается, тогда  $P_2$  растёт, что приводит к сжатию плюсовой мембранной коробки (рис. 8.2) и расширению минусовой. Часть жид-

кости из минусовой камеры выталкивается в импульсную линию, изменив уровень в ней на величину  $\Delta h$ . Отсюда  $\Delta P^1 = (H - \Delta h)\rho g$ , где  $\Delta P^1 < \Delta P$  и показания уровнемера будут занижены. Установкой уравнительного сосуда большого диаметра можно уменьшить  $\Delta h$ , так как один и тот же объем жидкости, вытолкнутой из минусовой камеры дифманометра, в широком сосуде вызовет меньшее изменение уровня, чем в узкой импульсной трубке.



**Рис. 8.2. Измерение уровня в емкости под атмосферным давлением**



**Рис. 8.3. Измерение уровня в емкости под атмосферным давлением с уравнительным сосудом**

В случае измерения уровня агрессивной жидкости на импульсных линиях устанавливаются разделительные устройства. При этом дифманометр и импульсные трубки ниже разделительных устройств заполняются неагрессивной жидкостью.

Измерение уровня в барабане котла с использованием однокамерного (рис. 8.4) и двухкамерного (рис. 8.5) уравнительных сосудов – это измерение уровня жидкости в резервуаре под давлением. Уравнительный сосуд 1 (рис.8.4) подсоединяется к паровому пространству, причем и сосуд и труба 2 тепловой изоляцией не покрываются. Трубка 3 непосредственно подключается к водяному пространству барабана. Выражение для разности давлений  $\Delta P$ , измеряемой дифманометром 4, может быть получено через

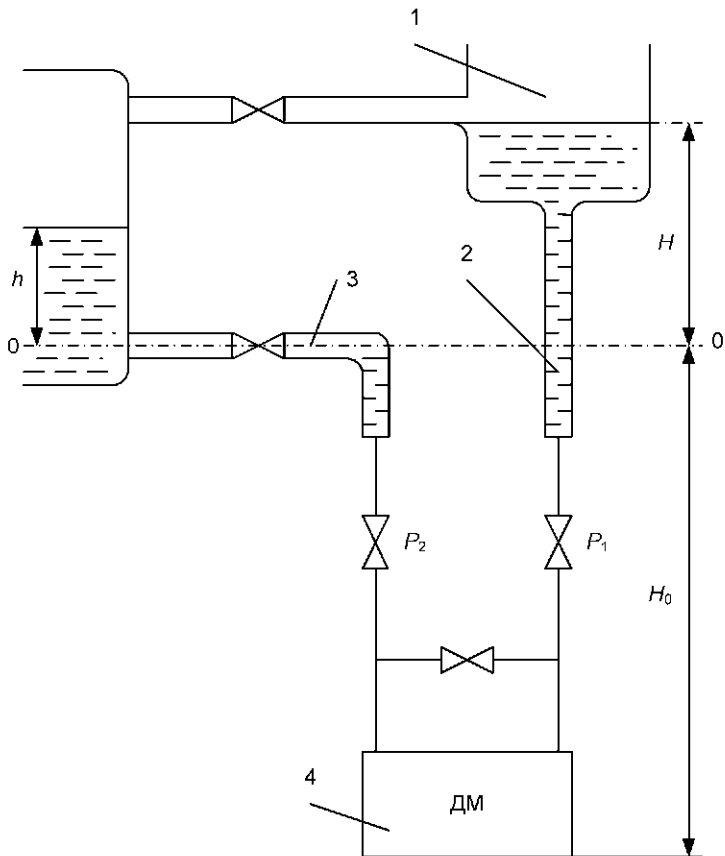
давления, создаваемые в плюсовой  $P_1$  и минусовой  $P_2$  камерах дифманомстра:

$$P_1 = (H + H_0) \cdot \rho_0 \cdot g;$$

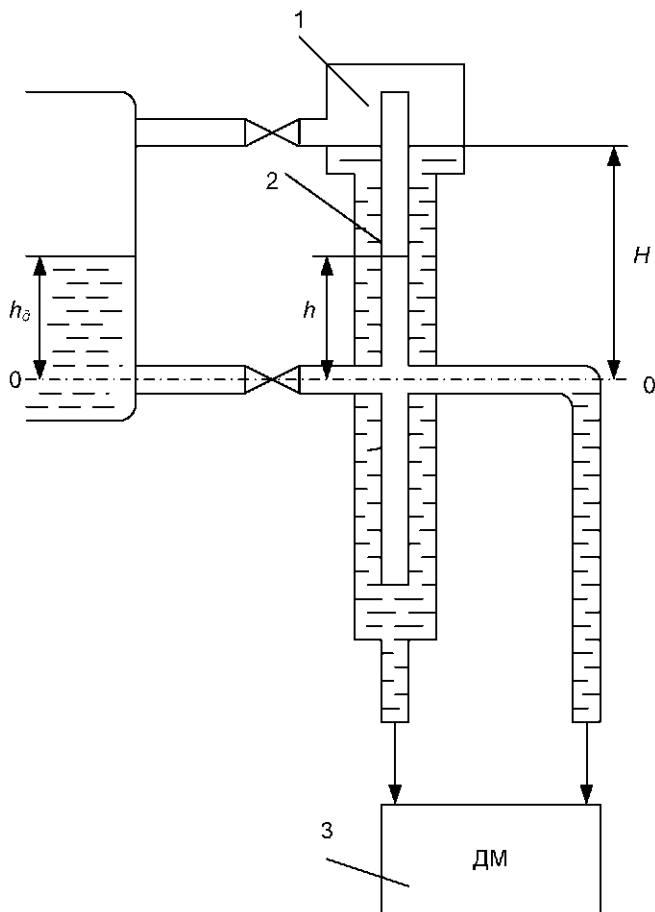
$$P_2 = H_0 \cdot \rho_0 \cdot g - h \cdot \rho' \cdot g + (H - h) \cdot \rho'' \cdot g,$$

отсюда:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = [H(\rho_0 - \rho') - h(\rho' - \rho'')] \cdot g \quad (8.2)$$



**Рис. 8.4.** Измерение уровня в емкости под избыточным давлением.  
Однокамерный уравнительный сосуд



**Рис. 8.5. Измерение уровня в емкости под избыточным давлением с двухкамерными измерительными сосудами**

Из (8.2) легко заметить, что показания уровнемера зависят не только от текущего значения  $H$ , но и от плотностей воды на линии насыщения  $\rho^i$  и пара  $\rho''$ , которые в свою очередь зависят от температуры и давления среды в барабане. Поэтому расчет шкалы дифманометров-уровнемеров производят на рабочее (номинальное) давление в барабане. Кроме того, на результат измерения будет оказывать влияние изменения плотности воды  $\rho_w$  в импульсной трубке 2, в то время как давление  $P_1$  должно оставаться по-



стоянным. Это может происходить при изменении температуры окружающей среды или температуры среды в барабане. Уменьшение влияния изменения  $\rho_v$  на показания уровнемера может быть достигнуто использованием двухкамерного уравнительного сосуда (рис. 8.5). Внешняя поверхность уравнительного сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией, для того чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 2, соединенной с водяным пространством барабана, была равна плотности воды в барабане, что обусловит равенство уровня  $h$  в трубке 2 и действительного уровня в барабане  $h_0$ . Для такой схемы выражение для перепада давления, действующего на дифманометр 3, имеет вид:

$$\Delta P = (H-h)(\rho' - \rho'')g,$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотности воды и пара при номинальном значении давления в барабане.

Таким образом, и при использовании такой схемы показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара ( $\rho' - \rho''$ ), которая являясь функцией давления в барабане, определяется режимом работы установки.

Метод измерения уровня дифманометрическими уровнемерами обладает рядом достоинств. Такие уровнемеры отличаются механической прочностью, простотой монтажа, надежностью. Существенный их недостаток: чувствительный элемент дифманометра находится в непосредственном контакте с контролируемой средой. Поэтому для агрессивных сред следует предусмотреть включение в импульсные линии разделительных устройств или продувку импульсных линий чистой водой.

## 8.2. Емкостные уровнемеры

Емкостными называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, частично введенного в жидкость, от уровня жидкости [20, 21, 28].

Конденсаторные преобразователи различают по конструкции: для электропроводной жидкости (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{ж} > 7$  и удельное сопротивление  $\rho < 10^6$  Ом·м) и для неэлектропроводной. В качестве электродов конденсаторные преоб-

разователи используют плоские пластины, стержни, цилиндры и даже металлическую стенку сосуда с измеряемым уровнем. Цилиндрические электроды являются предпочтительными из-за хорошей технологичности, лучшей помехоустойчивости и большей жесткости конструкции.

Конденсаторный преобразователь для неэлектропроводных жидкостей (рис. 8.6а), состоит из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня.

Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором 4. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, часть межэлектродного пространства которого высотой  $h$  заполнена контролируемой неэлектропроводной жидкостью, которая является диэлектриком емкости  $C_1$ , оставшаяся часть высотой  $(H - h)$  — ее парами и образует емкость  $C_2$ .

В общем виде, емкость цилиндрического конденсатора определяется выражением

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot H \ln(d_2/d_1). \quad (8.3)$$

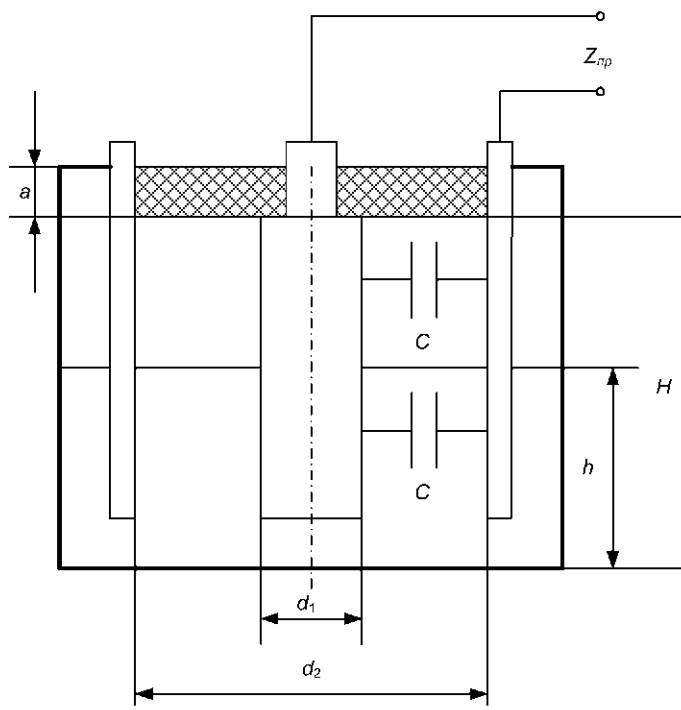
где:  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость неэлектропроводной жидкости, заполняющей межэлектродное пространство;  $H$  — длина электродов (максимальный уровень);  $d_1$ ,  $d_2$  — диаметры, соответственно, внутреннего и наружного электродов.

Суммарное выходное сопротивление преобразователя  $Z_{\text{пр}}$  кроме емкостей  $C_1$  и  $C_2$  определяется также емкостью  $C_{\text{и}}$  проходного изолятора и его активным сопротивлением  $R_{\text{и}}$  (емкость  $C_{\text{и}}$  образуются электродами преобразователя на участке  $a$ ; сопротивление  $R_{\text{и}}$  обусловлено проводимостью материала изолятора на этом участке), а также емкостью и проводимостью соединительного кабеля.

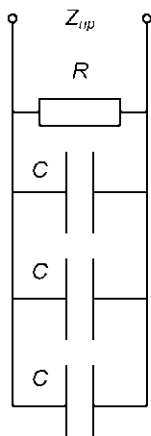
Таким образом, эквивалентная электрическая схема преобразователя имеет вид изображенный на рис. 8.6б. Суммарная емкость преобразователя:  $C_{\text{пр}} = C_1 + C_2 + C_{\text{и}}$ .

Емкость  $C_{\text{и}}$  от значения  $h$  не зависит, кроме того, для газов  $\varepsilon_r \approx 1$ , поэтому

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{и}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln(d_2/d_1)} \cdot H \left[ 1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right]. \quad (8.4)$$



а)



б)

**Рис. 8.6. Схема емкостного уровнемера для неэлектропроводных сред**

Таким образом, если  $\epsilon_{\text{ж}} - \text{const}$ , емкость  $C_{\text{пр}}$  однозначно зависит от измеряемого уровня  $h$ . В реальных условиях эксплуатации,  $\epsilon_{\text{ж}}$  может изменяться (например, при изменении температуры жидкости, ее состава и т.д.).

Для уменьшения температурных погрешностей применяется компенсационный конденсатор, представленный в виде конденсаторного преобразователя, постоянно погруженного в жидкость и емкость которого зависит только от температуры жидкости. Емкость компенсационного конденсатора используется в электронной схеме в качестве корректирующего сигнала. Недостатком такой схемы введения поправки является увеличение неизмеряемого уровня, обусловленного высотой электродов компенсационного конденсатора.

В конденсаторных преобразователях для электропроводных жидкостей один электрод выполняется изолированным. Если резервуар металлический, то его стенки могут быть использованы в качестве второго электрода.

На рис. 8.7а изображена схема преобразователя, выполненного в виде стержня 1, покрытого слоем изоляции 2 и погруженного в металлический резервуар 3.

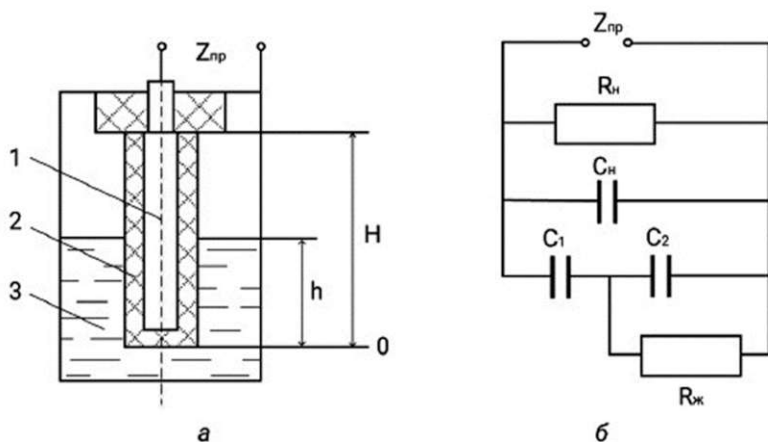


Рис. 8.7. Схема емкостного уровнемера для электропроводных сред

Если пренебречь диэлектрической проницаемостью газов над жидкостью по сравнению с диэлектрической проницаемостью изоляции электрода, то электрическую схему преобразователя можно представить в виде, изображенной на рис.8.7б. Зависящую от уровня емкость преобразователя можно представить как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ .  $C_1$  – емкость конденсатора, обкладками которого являются поверхность электрода 1 и поверхность электропроводной жидкости на границе с изолятором 2. Диэлектриком этого конденсатора является материал изолятора. При увеличении  $h$  увеличивается площадь обкладки – поверхность жидкости, что ведет к увеличению  $C_1$ . Параметр  $C_2$  – емкость конденсатора, одной обкладкой которого является поверхность жидкости на границе с изолятором 2 (общая с обкладкой конденсатора  $C_1$ , второй – поверхность резервуара 3. С увеличением  $h$  емкость  $C_2$  также растет.  $R_{ж}$  – активное сопротивление жидкости;  $C_{и}$ ,  $R_{и}$  – емкость и активное сопротивление проходного изолятора. Таким образом, полная емкость преобразователя определяется выражением:

$$C_{\text{ир}} = C_{и} + C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (8.5)$$

В емкостных уровнях для измерения электрической емкости преобразуются резонансные и мостовые схемы [20, 21, 28].

Емкостные уровнемеры нашли широкое распространение, особенно в качестве сигнализаторов, из-за дешевизны, простоты обслуживания, удобства монтажа первичного преобразователя на резервуаре, отсутствия подвижных элементов, возможности использования в достаточно широком интервале температур (от криогенных до + 500°С) и давлений.

К числу недостатков их следует отнести непригодность для измерения уровня вязких, пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей и изменению емкости кабеля, соединяющего первичный преобразователь с измерительным прибором.

В настоящее время на рынке приборов появились микропроцессорные стержневые емкостные уровнемеры с размещением электронной части в головке преобразователя. Преобразователи

работают при температурах от  $-200$  до  $400^{\circ}\text{C}$  при давлениях от вакуума до  $50$  МПа. Наряду с выходным сигналом  $4\dots 20$  мА преобразователь имеет цифровой сигнал по HART – протоколу, погрешность составляет  $\pm 0,1\%$  [20, 21, 28].

Данная глава была посвящена измерению уровня. В ней рассматривались уровнемеры с визуальным отсчетом показаний, дифманометрические уровнемеры (где уровень измеряется по перепаду давления), а также емкостные уровнемеры.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Какие факторы влияют на показания дифманометрического уровнемера?
2. Для каких целей используются уравнительные сосуды?
3. Какими достоинствами обладают дифманометрические уровнемеры?
4. На чем основан принцип действия ёмкостного уровнемера?
5. Применим ли ёмкостный уровнемер для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей? Обоснуйте свой ответ.
6. Что можно использовать в качестве электродов в емкостных уровнемерах?
7. Как уменьшить температурную погрешность измерения емкостного уровнемера?
8. Начертите структурную схему ёмкостного уровнемера для электропроводных сред, дайте необходимые пояснения.
9. В чем заключаются достоинства ёмкостных уровнемеров?
10. Что влияет на точность измерения при измерении уровня в барабане котла?

## Глава 9. АНАЛИЗ ГАЗОВЫХ СРЕД

### 9.1. Общие сведения

Средства измерения для количественного анализа газовых сред называются газоанализаторами и газовыми хроматографами [16, 20, 21, 28, 29].

На тепловых объектах газоанализаторы нашли широкое применение для автоматического контроля за процессом горения по составу уходящих газов при сжигании органических топлив и определения требуемого избытка воздуха, в системах охлаждения мощных турбогенераторов для измерения концентрации водорода в сдувках аппаратов. С помощью непрерывного автоматического контроля состава газов осуществляется автоматизированное управление химико-технологическими процессами, связанными с получением и использованием газов в металлургии, коксохимическом производстве, нефтепереработке, газовой промышленности. В настоящее время резко возросло производство и использование газоанализаторов, предназначенных, для охраны окружающей среды от вредных примесей, содержащихся в газовых выбросах промышленных предприятий и электрических станций. Периодическое измерение концентрации таких основных загрязняющих веществ, как сернистый газ, окись углерода, двуокись азота и пыль, составляют основу контроля за качеством воздуха в населенных пунктах, в соответствии ГОСТ 17.2.3.01-86.

Газоанализаторы градуируются в % по объему,  $г/м^3$ , мг/л. Первый способ градуировки является более удобным, поскольку процентное содержание компонентов газовой смеси сохраняется при изменении температуры и давления. С помощью аттестованных эталонных газовых смесей производится воспроизведение единиц измерения концентрации компонентов газовых смесей [16, 26, 29].

Измерение концентрации того или иного компонента в газовой смеси производится по изменению физико-химических свойств смеси, вызванных изменением концентрации определяемого компонента. Такое утверждение имеет место только для бинарных смесей, состоящих из двух компонентов, в которых определяемый компонент влияет на измеряемое физико-химическое

свойство смеси, а остальные компоненты, независимо от их состава и концентрации, не влияют и считаются вторым компонентом:  $C_0 + C_n = 1$ , где  $C_0$  – концентрация определяемого компонента в %, а  $C_n$  – концентрация неопределяемого компонента (второго), в %.

Классификация газоанализаторов производится исходя из характеристики физико-химических свойств, положенных в основу измерения концентрации определяемых компонентов смеси, и включает следующие основные группы средств измерений [26]:

- *механические*, основанные на измерении объема пробы газовой смеси после удаления анализируемого компонента. Удаление компонента осуществляется в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания. Наиболее распространенными приборами этого типа являются объемные химические газоанализаторы. Они относятся к лабораторным средствам измерения периодического действия, в которых отбор пробы и другие операции выполняются вручную. Примером таких приборов ГХП-2, ГХП-3, цифры 2 или 3 указывают на число определяемых компонентов. Достоинство данного метода заключается в возможности измерения разнообразных многокомпонентных газовых смесей и, в простоте устройства СИ. К числу недостатков можно отнести: низкую точность анализа (0,1–0,2% общего объема пробы); периодичность действия; необходимость частой замены реактивов; сложность создания на этом принципе автоматических приборов; громоздкость СИ из-за большого числа элементов стекла [26].

- *тепловые*, основанные на измерении тепловых свойств бинарной газовой смеси, зависящих от концентрации определенного компонента. В зависимости от тепловых свойств газовой смеси тепловые газоанализаторы делятся на термокондуктометрические (тепловое свойство – теплопроводность) и термохимические (тепловое свойство – количество теплоты, выделившейся при реакции каталитического окисления определяемого компонента).

Тепловые газоанализаторы будут рассмотрены ниже.

- *магнитные*, основанные на измерении одного из магнитных свойств бинарной смеси – магнитной восприимчивости при изменении концентрации определяемого компонента. Различные газы имеют разную магнитную восприимчивость  $\chi$ . Наибольшей



магнитной восприимчивостью обладает кислород, его относительная объемная магнитная восприимчивость принята за 1 и соответственно рассматриваемый метод применяется для определения концентрации кислорода в газовой смеси. Средства измерений, осуществляющее эти измерения, называются кислородомрами.

- *оптические*, основанные на измерении концентрации определяемого компонента по изменению оптических свойств газовой смеси, а именно: показателей преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральной плотности и т.д. Наиболее распространенными являются оптические газоанализаторы инфракрасного и ультрафиолетового поглощения, а также фотокориметрические газоанализаторы [26].

Для анализа многокомпонентных газовых сред используются хроматографические газоанализаторы. Они относятся к приборам периодического действия, сложны по устройству и капризны в обслуживании.

Газоанализаторы, в отличие от средств измерения температуры или давления представляют собой установку, которая наряду с первичным измерительным преобразователем (приемником) включает ряд устройств обеспечивающих отбор, подготовку и продвижение пробы газа через прибор.

Газоанализаторы в зависимости от назначения выпускаются двух видов: измерительные приборы (качественная и количественная информация) и датчики (индикаторы, сигнализаторы и детекторы утечки газов). Датчики в отличие от измерительных приборов по конструкции имеют меньшее число вспомогательных устройств.

## 9.2. Термокондуктометрические газоанализаторы

Термокондуктометрические газоанализаторы относятся к группе тепловых газоанализаторов, предназначенных для измерения концентрации одного из компонентов бинарных газовых смесей по изменению теплопроводности смеси. Анализ газовой смеси по ее теплопроводности возможен при условии, что все компоненты газовой смеси, кроме определяемого, имеют одинаковую теплопроводность и представляют вторую компоненту –

неопределяемую. Теплопроводности определяемого компонента  $\lambda_0$  и неопределяемого  $\lambda_n$  для обеспечения максимальной чувствительности должны значительно отличаться по значению друг от друга. Значение теплопроводности зависит от температуры и, поэтому, в соответствии с таблицей относительных теплопроводностей газов при температурах [20, 21, 26, 28], наиболее благоприятный температурный режим для анализа по теплопроводности обеспечивается при 80 – 100°C. Если в газовой смеси имеются компоненты, которые могут исказить результаты анализа, то эти компоненты из газовой смеси должны быть удалены.

В основе принципа измерения по теплопроводности лежит близкая к линейной зависимость между теплопроводностью газовой смеси  $\lambda$ , теплопроводностью  $\lambda_i$  и концентрацией  $C_i$  входящих в ее состав  $n$  компонентов:

$$\lambda = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \dots + \lambda_n C_n = (x + a)^n = \sum_{i=0}^n \lambda_i C_i \quad (9.1)$$

Для бинарных смесей выражение (8.1) можно представить следующей зависимостью:

$$\lambda = \lambda_0 C_0 + \lambda_n C_n \quad (9.2)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность определяемого компонента;  $\lambda_n$  – совпадающая теплопроводность неопределяемых компонентов;  $C_0$  – концентрация определяемого компонента, %;  $C_n$  – суммарная концентрация неопределяемых компонентов, %.

Исходя из того, что  $C_0 + C_n = 1$ , тогда из выражения (9.2):

$$C_0 = (\lambda - \lambda_n) / (\lambda_0 - \lambda_n) \quad (9.3)$$

Для известных и постоянных при  $t = 80 \div 100^\circ\text{C}$  теплопроводностях неопределяемой и определяемой компонент измеряемая величина  $C_0$  однозначно зависит от теплопроводности газовой смеси:  $C_0 = f(\lambda)$ .

Теплопроводность – неэлектрическая величина, для ее измерения используется нагреваемый ток проводник (чувствительный элемент) из платины, обладающий высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления и химической стойкостью, который помещают в камеру, заполненную анализируемой смесью.

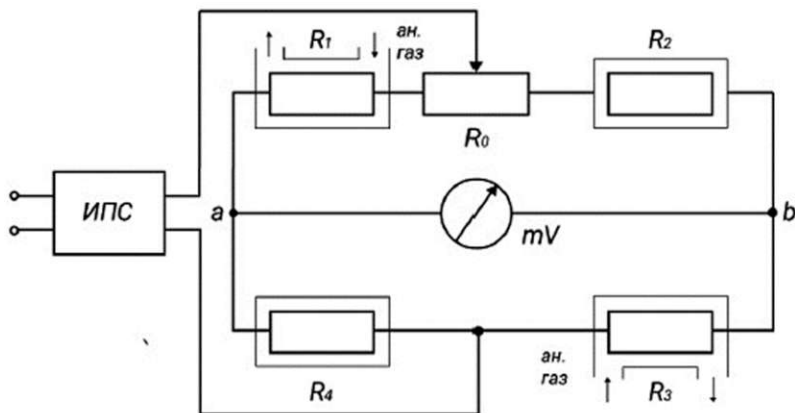
При условии, что отдача тепла от проводника стенкам камеры осуществляется только в результате теплопроводности, имеет место следующая зависимость:

$$Q = 2\pi\lambda L(t_{\text{п}} - t_{\text{ст}})/l_{\text{п}}D/d, \quad (9.4)$$

где  $Q$  – количество теплоты, отдаваемой проводником в секунду;  $L, d$  – длина и диаметр проводника;  $D$  – диаметр камеры;  $\lambda$  – теплопроводность газовой смеси;  $t_{\text{п}}, t_{\text{ст}}$  – температура проводника и стенок камеры.

Если количество теплоты, отдаваемое проводником,  $Q$  и температура стенок камеры  $t_{\text{ст}}$ , зависящая от температуры окружающей среды, остаются постоянными, то изменение теплопроводности газовой смеси, вызванное изменением концентрации определяемого компонента, приведет к изменению температуры чувствительного элемента (проводника),  $t_{\text{п}}$ , а следовательно, и его сопротивление, т.к.:  $R_{\text{п}} = f(t_{\text{п}})$ .

Для измерения сопротивления проволочных чувствительных элементов используются мостовые схемы. Если мостовая схема – неуравновешенный мост (рис. 9.1), питаемый источником питания стабилизированными (ИПС), то  $U_{\text{вых}} = f(C_0)$ .



**Рис. 9.1. Измерительная мостовая схема газоанализатора**

Для достоверности результатов измерительного процесса необходимо обеспечить:

- защиту от влияния колебаний температуры окружающего воздуха в месте установки первичного преобразователя для достижения постоянства температуры стенок камеры;
- стабилизацию температуры и влажности анализируемой газовой смеси, поступающей в присмный преобразователь газоанализатора;
- постоянство расхода анализируемого газа через чувствительный элемент присмного преобразователя газоанализатора;
- применение измерительных схем, позволяющих повысить точность измерения выходного электрического сигнала.

Варианты решения перечисленных факторов определяют модификации промышленных термокондуктометрических газоанализаторов от существующих типов ТКГ, ГЭД, ГЭУ, ТП, ГТВ до более современных микропроцессорных АГ-0012. Газоанализатор АГ-0012 при пределах измерения концентрации водорода в азоте от 0...1 до 0...10% имеет приведенную погрешность измерения от  $\pm 4,5$  до  $\pm 2\%$ . Прибор помимо цифрового индикатора ЦИ имеет на выходе токовый унифицированный сигнал и цепи сигнализации ЦСг.

Область применения термокондуктометрических газоанализаторов – анализ содержащих  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $Ag$ ,  $O_2$ ,  $NH_3$ , в системе охлаждения мощных турбогенераторов, в топочных газах и газах производства аммиака, хлора, аргона, серной кислоты.

### 9.3. Термохимические газоанализаторы

Термохимические газоанализаторы относятся к группе тепловых газоанализаторов, осуществляющих анализ бинарных газовых сред [20, 21, 26, 28]. Измерение концентрации определяемого компонента в этих приборах однозначно связано с измерением количества теплоты, выделившейся при реакции каталитического окисления определяемого компонента на поверхности чувствительного элемента, выполняющего функцию катализатора. Чувствительный элемент может быть представлен или в виде нагретой платиновой нити, или поверхности гранулированного катализатора. Вид катализатора определяет модификацию термохимиче-

ского газоанализатора, которые используются для определения концентрации следующих:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ .

В первичном преобразователе термохимического газоанализатора происходит измерительный процесс, представляющий последовательную цепь преобразований: изменение концентрации определяемого компонента  $C_0$  приводит к количественному изменению теплоты  $Q$ , воспринимаемой чувствительным элементом, который изменяя свою температуру  $t_{\text{п}}$ , приводит к изменению сопротивления  $R_{\text{п}}$ , т.е.:  $C_0 \rightarrow Q \rightarrow t_{\text{п}} \rightarrow R_{\text{п}}$ .

Для измерения сопротивления применяются мостовые схемы, аналогичные приведенной на рис. 9.1. Выходное напряжение мостовой схемы пропорционально концентрации определяемого компонента и может быть зафиксировано показывающим прибором со шкалой, проградуированной в единицах концентрации определяемого компонента.

Термохимические газоанализаторы не отличаются высокой чувствительностью и используются в качестве детектора в газовых хроматографах и, как сигнализаторы, индикаторы взрывоопасных концентраций газов, например, газоанализатор типа СГГ, измеряющий концентрацию  $\text{H}_2$  в воздухе.

## 9.4. Магнитные газоанализаторы

Магнитные газоанализаторы предназначены для анализа бинарных газовых сред [20, 21, 26, 28]. Принцип действия приборов основан на изменении магнитных свойств газовой смеси при изменении концентрации определяемого компонента. Из известных магнитных свойств рассматривается свойство магнитной восприимчивости газов. По магнитной восприимчивости все газы делятся на парамагнитные, втягиваемые в магнитное поле и диамагнитные, выталкиваемые из него. Соответственно, первые имеют положительную магнитную восприимчивость, вторые – отрицательную. Среди парамагнитных газов кислород занимает первое место, его относительная объемная магнитная восприимчивость принята за единицу. К парамагнитным газам относятся также окись азота  $\text{NO}$  (0,363) и двуокись азота  $\text{NO}_2$  (0,0616), но, являясь продуктами высокотемпературных окислительных реак-

ций, встречаются редко и в малых концентрациях. Другие, наиболее часто встречаемые газы, являются диамагнитными [25]. Следовательно, рассматриваемый метод газового анализа применим только для кислорода  $O_2$  и поэтому магнитные газоанализаторы иногда называют – кислородомерами.

Объемная магнитная восприимчивость  $\chi$  по закону Кюри связана с параметрами газовой среды зависимостью:

$$\chi = CPM/(T^2R), \quad (9.6)$$

$$x_{см} = \sum_{i=1}^n C_i X_i = C_K X_K + (1 - C_K) X_H, \quad (9.7)$$

где  $C_K$  и  $X_K$  – объемная концентрация кислорода и его магнитная восприимчивость;  $X_H$  – усредненная магнитная восприимчивость неопределяемых компонентов.

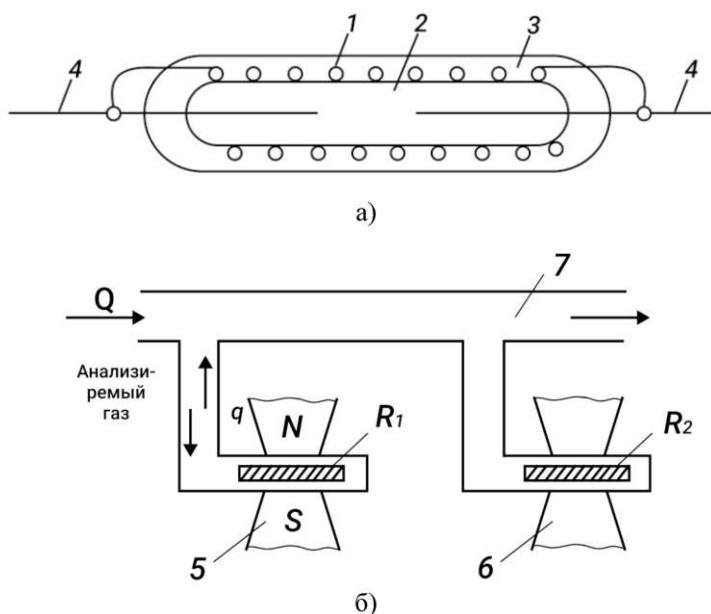
Учитывая, что  $x_K \gg x_H$ , то  $x_{см} = f(x_K)$  и анализируя зависимость (9.6) нетрудно заметить, что при постоянных параметрах газовой смеси, т.е.  $P$  и  $T$  постоянны,  $x_{см} = f(M)$ , а следовательно концентрации кислорода в газовой смеси.

Однако, при технических измерениях для измерения магнитной восприимчивости газовой смеси из существующих методов выбран тот, который, используя зависимость  $\chi=1/T^2$ , позволяет применить в измерительном процессе явление термомагнитной конвекции.

Термомагнитная конвекция – это свободное перемещение (без всяких побудителей расхода) кислородосодержащей газовой смеси в неоднородном магнитном и тепловом полях.

Для реализации этого явления в промышленных газоанализаторах, например, типа МН, применяется первичный преобразователь (приемник), содержащий чувствительный элемент – платиновый терморезистор  $R_1$  (рис. 9.2) нагретый током до определенной температуры и помещенный между полюсами постоянного магнита. Кислородосодержащая газовая смесь, протекающая по трубке 7, втягивается в магнитное поле, нагревается от резистора  $R_1$ , снижая его температуру и соответственно сопротивление, при этом магнитная восприимчивость газовой смеси, согласно (9.5),

резко уменьшается. Холодный газ, имеющий большую магнитную восприимчивость, выталкивается нагретый, создавая поток термомагнитной конвекции. Часть тепловой энергии передается платиновому терморезистору  $R_2$ , размещенному внутри немагнитного медного блока (ложного магнита), имеющему ту же массу и конфигурацию, что и постоянный магнит, для обеспечения одинаковых условий теплоотдачи. При этом с увеличением температуры резистора  $R_2$ , растет его сопротивление. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  включены в схему неуравновешанного моста и их изменение приводит к изменению выходного напряжения, пропорционально концентрации кислорода.



**Рис. 9.2. Схема чувствительного элемента кислородомера (а) и преобразователя с внешней магнитной конвекцией (б) и преобразователя с внешней магнитной конвекцией (б):**

1 – платиновая проволока; 2 – стеклянный капилляр; 3 – стеклянное покрытие; 4 – токоввод; 5 – постоянный магнит; 6 – немагнитный медный блок; 7 – труба

На этапе преобразования термомагнитной восприимчивости кислорода в изменение температуры чувствительного элемента через термомагнитную конвекцию источниками дополнительных погреш-

ностей являются: изменение температуры окружающей среды, влияющей на температуру стенок камеры, колебание давления газовой смеси и изменение теплопроводности газовой смеси.

В рассматриваемых газоанализаторах типа МН, повышение точности и достоверности измерения достигается применением двухмостовой схемы, состоящей из рабочего моста и моста сравнения, имеющих один источник питания, а выходные напряжения с них соединены по компенсационной схеме. Так достигается снижение погрешности от колебаний напряжения питания и температуры окружающей среды. Постоянство давления газовой смеси обеспечивается постоянством расхода газовой смеси, подаваемой на прибор, а влияние изменения теплопроводности газовой среды при термомагнитной конвекции уменьшается за счёт применения ложного магнита.

В современных, микропроцессорных магнитных кислородомерах типа АГ-0011 используется одностовая измерительная схема. Для компенсации влияния температуры окружающей среды, изменения теплопроводности и давления газовой смеси используются три мостовые схемы, плечи которых включают соответственно термо-, тензо- и термокондуктометрические преобразователи. Коммутатор подает выходные сигналы перечисленных элементов на аналого-цифровой преобразователь микропроцессорного блока, в котором производится коррекция выходного сигнала кислородомера по температуре, теплопроводности и давлению анализируемой газовой смеси. Кислородомер имеет на выходе цифровое табло, токовый унифицированный сигнал и цепи сигнализации [26].

Для кислородомеров не требуется предварительного удаления неопределяемых компонентов из газовой смеси, так как магнитная восприимчивость кислорода резко отличается от восприимчивости других газов.

## 9.5. Хроматографические газоанализаторы

Хроматографические газоанализаторы предназначены для анализа многокомпонентных газовых смесей [16, 20, 21, 28].

Область применения этих приборов широка: от контроля и автоматизации технологических процессов в химической



и нефтехимической промышленности, до периодического анализа продуктов горения различных видов топлива в энергетике.

Процесс измерения в хроматографах включает две стадии: хроматографическое разделение газовой смеси на отдельные компоненты и идентификация компонентов, включающая качественный и количественный их анализ.

Хроматографическое разделение многокомпонентной газовой смеси на отдельные компоненты, открытое в 1903 г. М.С. Цветом, осуществляется за счет различной скорости движения газов вдоль слоя сорбента, обусловленной различным характером внешних и внутренних межмолекулярных взаимодействий (адсорбционной способности) [16].

Количественный и качественный анализ бинарных газовых смесей после хроматографического разделения осуществляется с помощью детектора (газоанализатора, основанного на одном из перечисленных выше методов).

Принципиальная схема хроматографа представлена на рис 9.3.

Из баллона 1 газ-носитель поступает в хроматограф. Регулятор 2 обеспечивает постоянную скорость, давление и расход газа носителя. В газ-носитель дозатором 3 периодически вводится проба анализируемого газа. В разделительной колонке 4, заполненной твердым или жидким сорбентом, анализируемая смесь разделяется на компоненты. Для улучшения разделения газовой смеси программным управлением. В разделительной колонке (рис. 9.4) вдоль слоя сорбента с большей скоростью движется наименее сорбируемый газ (тип А), затем средне сорбируемый – тип В и последним – хорошо сорбируемый – тип С. После разделения каждый компонент с газом-носителем образует бинарную смесь, количественный анализ которой производится в детекторе 6. В качестве газов-носителей в хроматографах используется азот, аргон, гелий, воздух, водород и углекислый газ. Выходной сигнал детектора 6 регистрируется вторичным прибором 7, а так же подается интегрирующее 8 и инфропечатающее 9 устройства.

Выходная информация газового хроматографа – хроматограмма.

Хроматограмма (рис. 9.5) является носителем как качественной информации – о виде компонентов смеси, так и количественной – об их концентрации. Значение последней определяется площадью пика или его высотой.

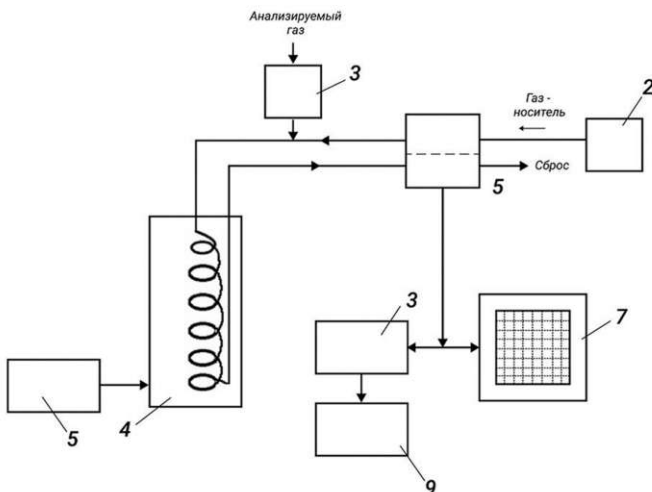


Рис. 9.3. Принципиальная схема газового хроматографа

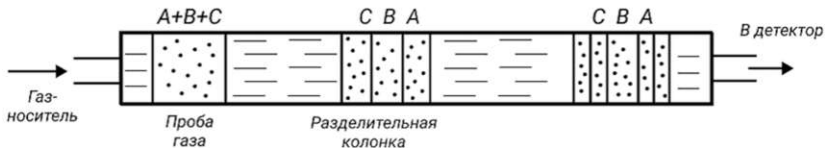


Рис. 9.4. Фрагмент разделительной колонки

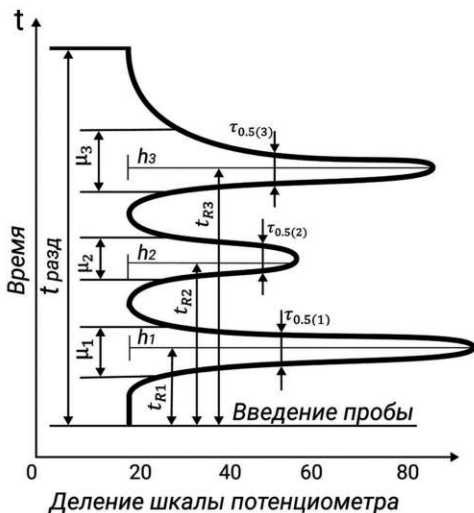


Рис. 9.5. Хроматограмма разделения газовой смеси, состоящей из трех компонентов

Качественная информация характеризуется временем удержания  $t_R$ , поскольку разделение газов осуществляется за счёт их различных сорбционных свойств и при постоянной скорости газаносителя, то время выхода того или иного компонента определяет вид газа.

Использование интегрирующего и цифровпечатывающего устройств вычислительного модуля, автоматизирует обработку хроматограмм и позволяет ввести информацию о составе газовой смеси в АСУ ТП.

Рассмотренный метод хроматографического разделения можно использовать для анализа низкокипящих газов, смесей летучих и термически стойких твердых и жидких веществ, температура кипения которых достигает  $500^{\circ}\text{C}$  и выше. К числу преимуществ данного метода относится так же высокая чувствительность в сочетании с малым объемом отбираемой пробы, сравнительно высокой точностью и малым временем анализа.

Как отечественная, так и зарубежная промышленность выпускает хроматографы, предназначенные для лабораторного и промышленного использования. Лабораторные средства характеризуются повышенной точностью, универсальностью, большим числом элементов и повышенными требованиями к условиям эксплуатации.

Промышленные хроматографы имеют более узкое назначение и вырабатываемый ими сигнал представляется в форме, удобной для использования при оперативном и автоматическом управлении технологическими процессами. К группе промышленных хроматографов относятся следующие: ХПА, ХТМ, «Нефтехим-СКЭП», «Микрохром-1».

Скомпонованные вместе промышленные газоанализаторы в многофункциональные системы обеспечивают промышленный контроль различных составляющих газов.

Девятая глава данного пособия рассматривает вопросы анализа химического состава газовых сред. Сначала излагаются общие теоретические вопросы анализа химического состава газовых смесей, далее – принцип действия и устройство некоторых видов газоанализаторов: термокондуктометрических, термохимических,

магнитных, хроматографических. В заключение следует отметить, что в настоящее время в силу повышения интереса к проблемам защиты окружающей среды, ужесточения экологических требований и требований к надежности и безопасности работы энергетического оборудования, анализ газовых сред оказывается весьма важной темой.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. В каких единицах градуируются газоанализаторы?
2. Какая смесь газов называется бинарной? Приведите пример бинарной смеси газов.
3. На чем основан принцип работы механического газоанализатора? Теплового газоанализатора?
4. Какие газоанализаторы используются для анализа многокомпонентной смеси газов?
5. Каков принцип работы термокондуктометрического газоанализатора?
6. Начертите измерительную схему термокондуктометрического газоанализатора, укажите его основные компоненты.
7. Какие факторы влияют на достоверность результатов измерения термокондуктометрическим газоанализатором?
8. На чем основан принцип работы магнитного газоанализатора?
9. Какое явление называется термомагнитной конвекцией?
10. На какие стадии делится процесс измерения в хроматографах?
11. За счет какого явления происходит разделение многокомпонентной газовой смеси на отдельные компоненты?
12. Нарисуйте принципиальную схему газового хроматографа, укажите её составные части.

## Глава 10. АНАЛИЗ СОСТАВА ЖИДКИХ СРЕД

### 10.1. Введение

Ведение технологических процессов во многих отраслях промышленности, в том числе, в энергетике, основано на анализе состава жидкости, в случае тепловой и атомной энергетики – это анализ состава рабочего тела, т.е., воды, сточных вод и т.д. Сейчас, с одной стороны, параметры рабочего тела на электростанциях достаточно высокие, с другой – ужесточаются требования к экологической безопасности, составу сточных вод и т.д., таким образом анализ химического состава воды весьма актуален [19–21, 28, 34].

В настоящее время на рынке представлены приборы ряда отечественных и зарубежных фирм. Среди отечественных фирм можно выделить «Техноприбор» [52], «Взор» [45], «Инэкотех» [40], «Альфа БАССЕНС» [43], среди зарубежных – «Swan Analytical Instruments» (Швейцария) [58], «Endress+Hauser» [56], «Mettler Toledo» (Швейцария) [57].

Приборы химического контроля можно разделить на три группы – лабораторные, портативные и стационарные. С помощью лабораторных приборов выполняется анализ пробы в лаборатории, переносные или портативные приборы можно доставить туда, где в данный момент требуется и выполнить необходимые измерения, стационарные приборы устанавливаются в месте, производят измерения постоянно. Современные стационарные приборы АХК (автоматического химического контроля) обычно относят к интеллектуальным датчиком; они оснащены модулем, который в документах производителей и литературных источниках может называться, например, ЖКИ (жидкокристаллический индикатор) или трансмиттер [46, 52]. Это устройство, оснащенное небольшим экраном и выполняющее вывод информации для персонала по месту, преобразование полученной от интеллектуального датчика информации в цифровую форму, хранение архива данных о работе интеллектуального датчика, прием команд от персонала по месту (например, запуск калибровки, изменение уставки срабатывания отсечного клапана на устройстве подготовки пробы и т.д.). У многих производителей, например, у «Техноприбора» [52], доступ к ряду функций ЖКИ может быть защищен паролем.

Согласно современным стандартам на энергетических предприятиях измеряются удельная электрическая проводимость, концентрация соединений натрия, содержание кислорода.

## 10.2. Методы и средства анализа состава жидкостей.

### Общие сведения

Анализ состава жидкостей – это важная составляющая измерительного процесса, отвечающего за качество ведения технологических процессов в химической, газо- и нефтехимической промышленности и водного режим энергетических предприятий [20, 21, 28, 29, 34].

Химический контроль теплоносителей в энергетике – это, прежде всего, защита энергооборудования от коррозии, увеличение срока его безаварийной работы, обеспечение высоких технико-экономических показателей работы энергетических предприятий.

В настоящее время очень актуален контроль сбросных вод промышленных предприятий и населенных пунктов в естественные и искусственные водосмы, что является важным этапом работы по охране окружающей среды.

Контроль за водным режимом тепловых объектов и работой установок по очистке воды, конденсата и сбросных вод, предполагает измерение множества показателей качества сред, отличающихся по химическому составу. Эти среды находятся под избыточным давлением, при разных температурах, отличаются по количеству в них примесей и других механических включений. Вследствие этого, установка для анализа жидкостей с целью исключения перечисленных выше факторов, влияющих на точность измерения, включает кроме первичного измерительного преобразователя дополнительные устройства для подготовки пробы и ее транспортировки [19, 34].

Существуют следующие методы анализа состава жидкостей: электрохимический, оптический и тепловой. Ниже будут рассмотрены только два метода: кондуктометрический и потенциометрический, которые нашли широкое применение на объектах теплоэнергетики. На основе этих методов созданы измерительные приборы, представляющие собой разновидности электрохимических анализаторов растворов.

## 10.3. Кондуктометрический метод анализа состава растворов. Кондуктометры

### 10.3.1. Общие сведения

Метод основан на измерении электропроводности растворов при изменении концентрации растворенного в них вещества [20, 21, 28].

Водные растворы веществ, которые проводят электрический ток, называют электролитами (это соли, щелочи, кислоты). Электролиты представляют собой проводники второго рода, где перенос тока осуществляется движением ионов. Суммарная же концентрация ионов, находящихся в растворе, характеризует электропроводность.

Удельная электропроводность раствора  $\chi$  связана с эквивалентной концентрацией растворенного в нем вещества  $n$  ( $\Gamma$ -экв/см<sup>3</sup>) следующей зависимостью:

$$\chi = \sigma n \lambda, \text{ См/с}, \quad (10.1)$$

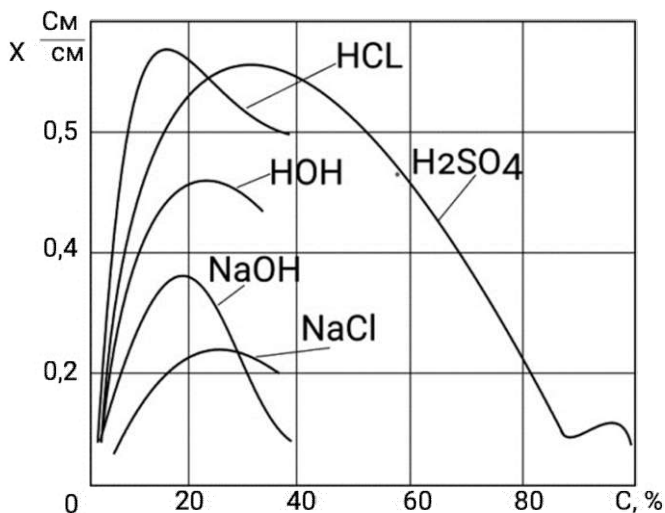
где  $\sigma$  – степень электролитической диссоциации молекул растворенного вещества;  $\lambda$  – эквивалентная электропроводность раствора при бесконечном разбавлении ( $\lambda = \lambda_{\alpha} + \lambda_{\kappa}$ , так как определяется подвижностью анионов  $\lambda_{\kappa}$ ).

Степень электролитической диссоциации молекул растворенного вещества  $\sigma$  зависит как от природы растворенного вещества, так и от его концентрации и определяется числом молекул, диссоциированных на ионы. Зависимость  $\sigma$  от концентрации определяет сложный характер зависимости удельной электропроводности от концентрации для разных веществ (рис. 10.1).

Эта зависимость является линейной для всех представленных на графике веществ при значениях концентрации от 5 до 10%, а для некоторых – и до 30%. Поэтому, чтобы исключить попадание в область экстремума, необходимо заранее знать область изменения измеряемых концентраций веществ, находящихся в растворе.

Из зависимости (10.1) следует, что удельная электропроводность есть функция концентрации растворенного вещества:

$$\chi = f(C). \quad (10.2)$$



**Рис. 10.1. Графики зависимости удельной электропроводности от концентрации при 18°C**

Следовательно, для измерения концентрации растворенного вещества достаточно измерить удельную электропроводность раствора.

Средства измерения для анализа состава раствора по его удельной электропроводности называются кондуктометрами и градуируются в единицах удельной электропроводности: См/см и мкСм/см.

Кондуктометры измеряющие содержание солей в паре, конденсате и питательной воде парогенераторов, обычно называют солемерами и градуируются они в процентах содержания анализируемого вещества (например, % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

По конструкции различают кондуктометры электродные и безэлектродные.

### ***10.3.2. Электродные кондуктометры***

Первичный преобразователь электродного кондуктометра представляет два электрода (пластины), погруженные в анализируемый раствор [20, 21, 28].



Сопротивление раствора между электродами  $R_x$  связано с его удельной электропроводностью следующей зависимостью:

$$R_x = l/(\chi S) = K/\chi, \quad (10.3)$$

где  $l, S$  – расстояние между электродами и их площадь;  $K = l/S, \text{ см}^{-1}$  – постоянная первичного преобразователя (датчика).

При известных значениях постоянной датчика, измеряя известными методами сопротивление  $R_x$ , осуществляем переход к удельной электропроводности и, учитывая однозначную зависимость  $\chi$  от концентрации, получаем результат анализа концентрации растворенного вещества.

Постоянная первичного преобразователя электродного кондуктометра определяется путем градуировки по образцовым растворам с известной электропроводностью.

Рассмотрим факторы, влияющие на работу датчика электродного кондуктометра.

Удельная электропроводность раствора зависит не только от концентрации вещества и его природы, но и от температуры, т.е.  $\chi = f(C, T)$ .

Уравнение Кольрауша устанавливает связь между удельной электропроводностью раствора и температурой:

$$\chi_t = \chi_{25}(1 + a\Delta t + \beta\Delta t^2), \quad (10.4)$$

где  $\Delta t = (t - 25)$ .

При изменении температуры в пределах 15–35°C квадратичным членом уравнения (10.4) можно пренебречь, тогда

$$\chi_t = \chi_{25}(1 + a\Delta t),$$

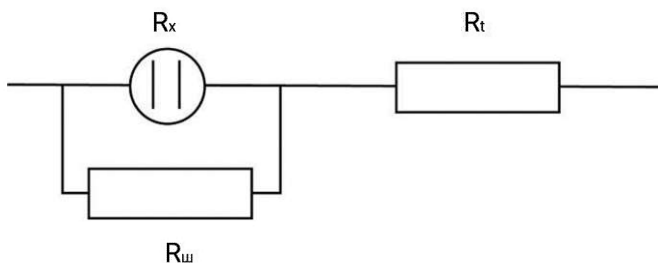
где  $a$  – коэффициент, характеризующий увеличение подвижности ионов с ростом температуры.

Температурные изменения удельной электропроводности значительны, и этим объясняется требование обязательного введения температурной компенсации. Для выполнения этого требования датчика электродного кондуктометра дополняется терморезистором, контролирующим температуру раствора. Учитывая обратно-пропорциональную зависимость сопротивления датчика от значения удельной электропроводности, для температурной ком-

пенсации выходного сигнала датчика при повышении температуры раствора необходима плюсовая поправка, которая позволила бы выходное значение  $R_x$  оставить постоянным при неизменной концентрации растворенного вещества. Этим требованиям отвечает медный резистор, который имеет положительную линейную зависимость сопротивления от температуры:

$$R_t = R_o(1 + at). \quad (10.5)$$

Для полной температурной компенсации необходимо согласовать температурные коэффициенты удельной электропроводности и медного терморезистора. Принимая во внимание, что  $a_x=0,02$  1/град, а  $a_{Rt}= 0,0042$  1/град, то необходимо шунтировать сопротивление датчика (электродной ячейки  $R_x$ ). Тогда, как один из вариантов, реализации температурной компенсации можно представить следующую схему (смотри рис. 10.2).



**Рис. 10.2.** Схема температурной компенсации

Уравнение температурной компенсации в этом случае представляет собой выражение:

$$\Delta[R_x R_{ш}/(R_x + R_{ш})]\Delta t = \Delta R_t, \quad (10.6)$$

где

$$\Delta R_t = a_M R_o \Delta t. \quad (10.7)$$

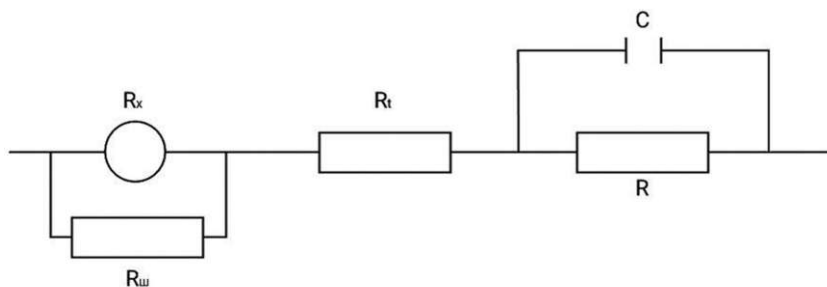
При росте температуры раствора левая часть уравнения (10.6) уменьшается, а правая растет, согласно выражению (10.7), и происходит полная температурная компенсация, т.е. удельная электропроводность  $k$  и функционально связанное с ней сопротивление  $R_x$  остаются зависимыми только от концентрации рас-

творенного вещества. Такой вариант температурной компенсации предполагает измерительную схему в виде автоматического уравновешенного моста, где одно из плеч моста выполнено согласно схеме, представленной на рис. 10.2.

При питании датчика электродного кондуктометра от сети постоянного тока происходит поляризация электродов, которая выражается в увеличении сопротивления раствора за счёт образования внутренней противо-ЭДС (так называемый электродный эффект). Электродные эффекты зависят при прочих равных условиях от материала электродов и состояния их поверхности. Платиновые электроды устойчивы к электродным эффектам, поэтому их применяют в лабораторных кондуктометрах. В промышленных кондуктометрах электроды выполнены из нержавеющей стали.

Для снятия электродных эффектов для питания первичного преобразователя используют переменный ток. Однако, наряду с устранением электродного эффекта датчика, при питании переменным током возникает, помимо активного, дополнительное емкостное сопротивление, зависящее от диэлектрической проницаемости раствора. Данный фактор необходимо учесть при измерении выходного сигнала датчика.

Комплексный характер сопротивления преобразователя учтен включением емкости в прилежащее к  $R_x$  плечо в схеме (рис. 10.3) автоматического уравновешенного моста, схема показана на рис. 10.3.



**Рис. 10.3. Фрагмент измерительной мостовой схемы**

Электропроводность воды, обусловленная концентрацией нелетучих компонентов (газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ ), нарушает пропорциональную зависимость между удельной электропроводностью анализируемого

раствора и концентрацией растворенного вещества. Для снижения влияния на электропроводность растворенных газов используются предвключенные Н – катионитовые фильтры, производится дегазация пробы и ее концентрирование путем упаривания.

Рассмотренный способ измерения  $R_x$  первичным преобразователем кондуктометра позволяет снизить влияние перечисленных выше факторов на результат измерения концентрации растворенного вещества.

Современный уровень развития микропроцессорной техники способствует совершенствованию измерительных схем и конструкций первичных преобразователей электродных кондуктометров.

Электродные преобразователи для измерения электропроводности в промышленных условиях разделяются на магистральные, погружные и проточные. К проточным электродным преобразователям относится микропроцессорные кондуктометры КАЦ-037 или Лидер-К, выпускаемые отечественной фирмой «Техноприбор» [352]. Кондуктометр КАЦ-037 содержит электродный преобразователь и микропроцессорный измерительный преобразователь. Диапазон измеряемых электропроводностей составляет от 0...0,2 до 0...200000 мкСм/см при пределе приведенной погрешности  $\pm 1.5\%$ . К числу распространенных анализаторов жидкости относятся кондуктометры серии АЖК-3101, КК, содержащие как электродные преобразователи, так и безэлектродные. Область применения этих средств: измерение электропроводности от  $10^{-6}$  до 1 см/см при диапазоне температур рабочей жидкости 10...60°C с предельной основной погрешностью  $\pm 2\%$ . На ТЭЦ нашли широкое применение индикаторы солесодержания РЭС с диапазоном измерения 0...4мг/кг и солемеры котловой воды САР, СКМ, имеющие диапазоны измерения условного солесодержания до 10000мг/л.

## **10.4. Потенциометрический метод анализа состава растворов. РН-метры**

### *10.4.1. Теоретические основы*

Качество питательной воды или конденсата на тепловых объектах характеризуется не только солесодержанием. Большое значение имеет характеристика кислотности или щелочности воды.

Повышенная кислотность приводит к ускорению коррозии трубопроводов и основного оборудования. Контроль щелочности и кислотности в процессе проведения обработки питательной воды перед подачей в парогенератор позволяет дозировать реагенты, способствующие очистке воды.

Для характеристики кислотности среды введен специальный параметр – водородный показатель рН [20, 21, 28].

рН определяет характер реакции раствора. Так, константа диссоциации чистой воды при температуре 22°C на ионы водорода Н и гидроксила ОН, определяется выражением:

$$K_{h20} = a_{H^+} \times a_{OH^-} = 10^{-14},$$

откуда  $a_{OH^+} = a_{OH^-} = 10^{-7}$ , т.е. раствор нейтральный при рН = 7.

Если рН > 7 – раствор щелочной, а когда рН < 7 – раствор кислый.

Таким образом, отклонение числа рН в водных растворах в ту или другую сторону от 7 характеризует меру их кислотных или щелочных свойств. Эта шкала зависимости соответствует температуре раствора 20 ÷ 25°C.

Приборы для измерения активной концентрации ионов водорода называются рН-метрами.

В этих приборах для измерения рН-растворов применяется потенциометрический метод, в котором связь активной концентрации ионов вещества в растворе с равновесным потенциалом на поверхности этого вещества (электроде) установлена законом Нернста.

Закон был открыт для металлических электродов, а позднее распространен на электроды из других веществ.

Если металлический электрод опустить в раствор, содержащий активную концентрацию ионов (катионов) этого металла, то на поверхности его возникает равновесный потенциал, являющийся функцией концентрации ионов этого металла в растворе.

Равновесный потенциал означает выравнивание скоростей анодного и катодного процессов, связанных с переходом ионов металла (анионов) в раствор и с переходом ионов (катионов) из раствора в электрод. При этом анодный процесс – окислительный, а катодный – восстановительный.

Если активная концентрация катионов металла в растворе равна 1 моль/л, то возникающий при этом потенциал называется нормальным (стандартным) и обозначается  $E_o$ .

Если активная концентрация катионов металла в растворе равно «а», то значение равновесного (электродного) потенциала вычисляется по уравнению Нернста

$$E = E_o + \left( \frac{RT}{nF} \ln a \right),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура раствора;  $F$  – число Фарадея;  $n$  – заряд ионов.

Из всего этого можно сделать вывод, если в раствор, содержащий активную концентрацию катионов водорода ( $H^+$ ), поместить измерительный водородный электрод, то можно измерить концентрацию ионов водорода по значению равновесного потенциала, образующегося на поверхности электрода, согласно закону Нернста.

Однако, непосредственно измерить значение равновесного потенциала  $E$  в растворе практически невозможно. Для измерения потенциала  $E$  измерительного электрода необходимо замкнуть электрическую цепь, вводя в раствор второй электрод со стабильным потенциалом, называемый вспомогательным или электродом сравнения.

Так возникает понятие «электродной системы», состоящей из измерительного (рабочего) электрода и электрода сравнения. Электродная система – это первичный измерительный преобразователь рН – метра.

#### *10.4.2. Измерительный электрод*

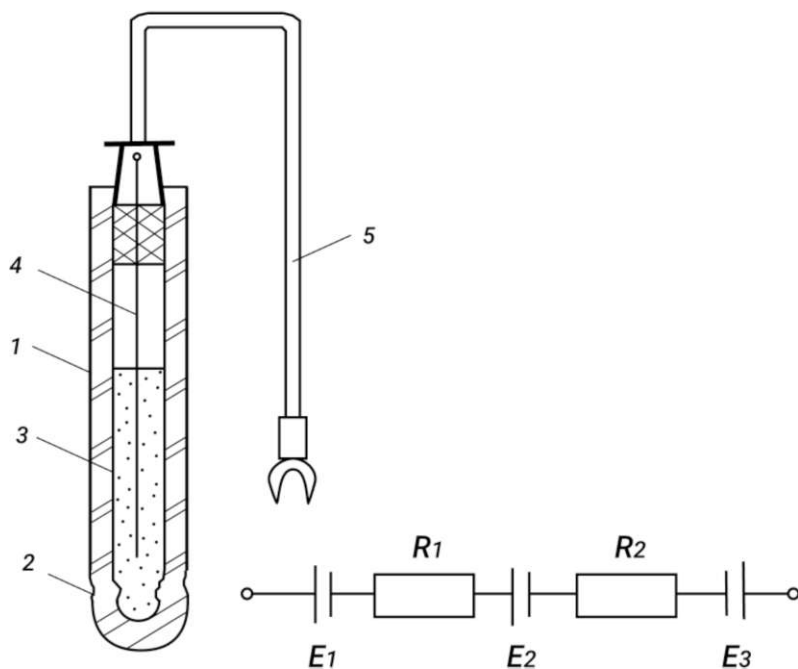
К измерительному электроду в рН-метрах предъявляются следующие основные требования [20, 21, 28]:

- линейная зависимость электродного потенциала от значения рН в широком диапазоне;
- незначительно (лучше линейное) изменение электродного потенциала в зависимости от температур раствора;
- возможность использования в разнообразных по химическому составу средах.

Рассмотрим в качестве измерительного электрода водородный электрод. Это платиновая пластина, покрытая слоем плати-

новой черни, которую насыщают газообразным водородом. Платина химически неактивна и благодаря хорошим адсорбционным свойствам является как бы растворителем водорода. Такой электрод ведет себя в растворе как электрод из твердого водорода. Водородный электрод, полностью отвечая первым двум требованиям, не обеспечивает остальные, и, кроме того, имеет большой недостаток, заключающийся в необходимости подачи в электрод химически чистого водорода. Все это не позволяет применить водородный электрод в промышленных условиях в качестве измерительного средства в рН-метрах. Водородные электроды используются только в качестве образцовых средств, применяемых в лабораторной практике.

Для измерения рН в промышленных условиях при изменении температуры раствора до  $150^{\circ}\text{C}$ , в качестве измерительных применяются стеклянные электроды (рис. 10.4).



**Рис. 10.4.** Схема измерительного стеклянного электрода и фрагмент эквивалентной электрической схемы

В стеклянных электродах водородными функциями обладает чувствительная тонкостенная мембрана 2, выполненная из литиевого или натриевого стекла. Водородные функции мембраны обусловлены замещением ионов щелочных металлов, более подвижными ионами водорода. Замещение происходит до наступления равновесного состояния.

Рабочий электрод выполнен из толстостенной стеклянной трубки 1, с припаянной на конце ее чувствительной мембраной 2. Стеклянная трубка заполнена раствором кислоты (НСI или НВг) 3 известной постоянной концентрации. В растворе кислоты находится контактный электрод 4, выполненный из серебра, покрытого слоем плохо растворимой соли AgCl (хлорсеребряный) или AgBr (бромсеребряный).

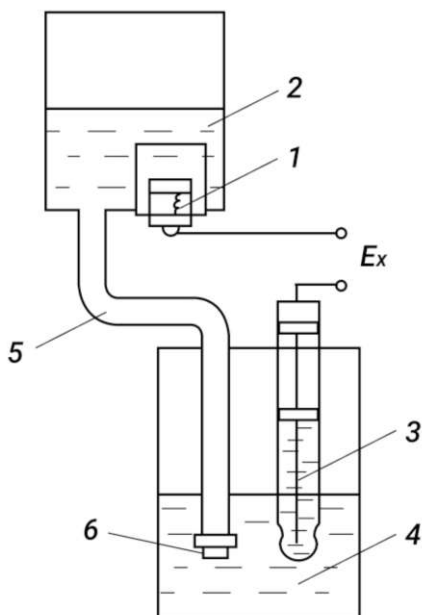
На внешней поверхности мембраны 2, выполняющей роль водородного электрода, при погружении рабочего электрода в анализируемый раствор, возникает потенциал  $E_3$ , зависящий от активной концентрации ионов водорода – pH. Для измерения потенциала  $E_3$  необходимо замкнуть электрическую цепь, состоящую из двух постоянных потенциалов  $E_1$ ,  $E_2$  и сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 10.4).  $E_1$  – потенциал возникающий на поверхности контактного электрода 4, он постоянный, (концентрация кислоты известна) и зависит только от температуры раствора.  $E_2$  – постоянный потенциал, развиваемый на внутренней поверхности мембраны, он зависит от температуры раствора.  $R_1$  – сопротивление электролита внутри электрода, а  $R_2$  – сопротивление мембраны  $R_1 \ll R_2$ .

Электролит 3 является тем проводником, который замыкает цепь между мембраной и контактным электродом 4, соединенным с выводным проводом 5.

Как уже отмечалось выше, электродная система содержит два электрода: рабочий и электрод сравнения (рис. 10.5).

Различают два типа электродов сравнения: погружные и выносные, а требование к ним одно – они должны обладать постоянным по величине потенциалом. Для исключения влияния температур раствора на потенциал вспомогательных электродов их делают выносными, вне анализируемого раствора, и соединяют с рабочим электродом с помощью электролитического ключа.





**Рис. 10.5. Схема электродной системы pH-метра с выносным электродом сравнения**

Каждая конкретная электродная система pH-метра имеет индивидуальную градуировочную характеристику, устанавливающую связь результирующей ЭДС –  $E_x$  с pH-раствора и его температурой (рис. 10.6) [20, 21, 28].

На рисунке 10.6 представлены градуировочные характеристики для одной и той же электродной системы, но для разных температур раствора. Как видно из рисунка, все градуировочные характеристики пересекаются в одной точке – «И». В точке «И»  $E_x$  не зависит от температуры раствора, она называется *изопотенциальной точкой*. Физически это означает, что  $E_3 = E_1 + E_2$ , и влияние температуры раствора на внешний потенциал  $E_3$  и на внутренние  $E_1 + E_2$  и влияние температуры раствора на внешний потенциал  $E_3$  и на внутренние  $E_1, E_2$  взаимно скомпенсировано. Если выразиться проще, то изопотенциальная точка – это точка, где результирующая ЭДС электродной системы одинакова при любой температуре раствора. Изопотенциальной точке соответствуют координаты  $E_{и}$  и  $pH_{и}$ .

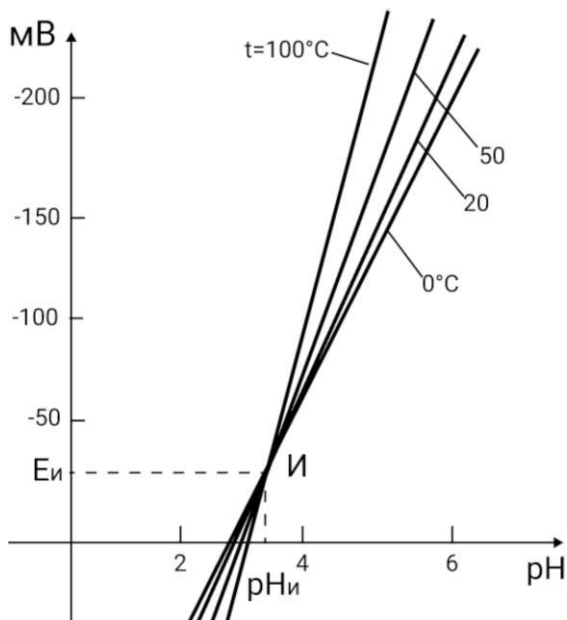


Рис. 10.6. Градуировочная характеристика электродной системы

#### 10.4.3. Электродная система для измерения pH-раствора

Для одной из промышленных электродных систем градуировочная характеристика определяется выражением:

$$E = -33 - (54,197 + 0,1984t_p)(pH - 3,28).$$

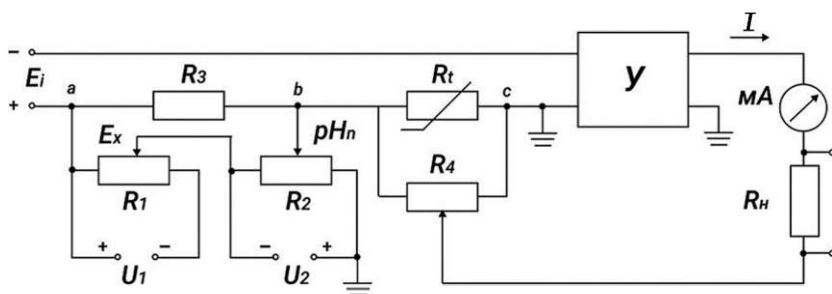
Соответственно, для этой электродной системы координаты изопотенциальной точки составляют:  $E_I = -33$  мВ,  $pH_I = 3,28$ .

Основное формирование измерительной информации происходит в первичном преобразователе. В pH-метрах — это электродная система, в которой при воплощении физического явления — закона Нернста — происходит преобразование неэлектрической величины pH в электрический сигнал. Выявление факторов, влияющих на точность такого преобразования, позволяет улучшить измерительный процесс в измерительном преобразователе.

Измерительная система должны учитывать особенности электродной системы, а именно:

- значительное внутреннее сопротивление;
- ограничение тока, протекающего через электроды до 10–12 мА, чтоб избежать поляризации электродов;
- зависимость результирующей ЭДС электродной системы по закону Нернста от температуры;
- индивидуальные градуировочные характеристики электродных систем;
- наличие изопотенциальной точки, изменяющей свои координаты с изменением электродной системы;
- изменение крутизны градуировочной характеристики электродной системы при различных температурах раствора.

Один из приемлемых вариантов реализации учета указанных особенностей рассмотрим на примере измерительной схемы, с отрицательной обратной связью, основанной на компенсационном методе измерения, представленной на рис. 10.7.



**Рис. 10.7.** Принципиальная схема измерительного преобразователя рН-метра

Усилитель «У», обладая большим коэффициентом усиления, позволяет осуществить компенсационный метод измерения и преобразование результирующей ЭДС  $E_x = f(\text{pH})$  в нормированный токовый сигнал постоянного тока. Измерительные схемы, основанные на компенсационном методе измерения, имеют высокоомное входное сопротивление ( $>10^{12}\text{Ом}$ ), чем обеспечивают реализацию учета первых двух особенностей электродной системы.

Выходной сигнал электродной системы  $E_x$  компенсируется напряжением на участке «а – с» т.е

$$E_x = -U_{ac}, \text{ где } U_{ac} = U_{ab} + U_{bc}.$$

Индикатором момента компенсации является усилитель, а его порог чувствительности определяет точность компенсации.

Для реализации всех явлений, происходящих в первичном преобразователе, в измерительном процессе преобразователя рН-метра, необходимо обратиться к уравнению градуировочной характеристики электродной системы или его графическому изображению на рис. 10.6.

Первый режим работы измерительного преобразователя рН-метра – это настройка на координаты изопотенциальной точки:  $E_{и}$  и  $pH_{и}$ .

Пусть  $E_x = E_{и}$ . Схема измерительного преобразователя должны обеспечить компенсацию входного сигнала равного  $E_{и}$ , настройку выходного сигнала измерительного преобразователя на  $pH_{и}$  или отсутствие температурной компенсации в изопотенциальной точке.

Для температурной компенсации в схеме предусмотрен резистор  $R_t$ , который погружен в анализируемый раствор.

Компенсация входного сигнала  $E_{и}$  достигается изменением напряжения на постоянном резисторе  $R_3$  ( $E_{и} = -U_{ab}$ ) путем взаимного смещения движков переменных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , находящихся в цепи источников стабилизированных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , включенных встречно.

Одновременно при взаимном изменении  $R_1$  и  $R_2$  добиваются отсутствия напряжения в цепи обратной связи при наличии тока на выходе с усилителя. В этом случае, положение движка переменного резистора  $R_2$  в фиксированной точке « $b$ » определяет координату изопотенциальной точки « $pH_{и}$ ».

Отсутствие температурной компенсации в изопотенциальной точке «И» обеспечивается тем, что выходной ток с усилителя, протекающий через резистор  $R_4$  и  $R_t$  компенсируется встречно направленным током на участке « $b-c$ » от источника стабилизированного питания  $U_2$ .

Правильность настройки на изопотенциальную точку рН-метра определяется по отсутствию изменения выходного сигнала с измерительного преобразователя при изменении сопротивления  $R_t$ .

Переменный резистор  $R_4$  обеспечивает настройку измерительного преобразователя при отклонениях крутизны градуировочной характеристики электродной системы.

#### 10.4.4. Рабочий режим рН-метра

На рис 10.6 выбираем градуировочную характеристику соответствующую температуре 20°C [20, 21, 28].

Пусть измеряемое значение рН=4, температура раствора постоянна. Тогда на вход измерительного преобразователя поступает результирующая ЭДС равная:  $E_x = E_{и} + \Delta E_1$ , а на вход усилителя, согласно сути компенсационного метода, поступает сигнал рассогласования  $\Delta U = E_x - U_{ac}$ .

Принимая во вниманис то, что  $U_{ab}$ , то  $\Delta U = \Delta E_1 - U_{bc}$ . Для компенсации  $\Delta U$  в цепи обратной связи «b-c» создается компенсационное напряжение  $U_{bc} = \Delta E_1$  на постоянных резисторах  $R_4$  и  $R_1$  от тока рассогласования  $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$  с усилителя, а  $\Delta U$  при этом стремиться к нулю.

#### 10.4.5. Третий режим работы – температурная компенсация

Пусть значение рН = 4, но температура раствора изменилась с 20°C до 40°C. Тогда, по градуировочной характеристики рис. 10.6, на вход измерительного преобразователя поступает сигнал с электродной системы равный [20, 21, 28]:

$$E_x = E_{и} + \Delta E_1 + \Delta E_t.$$

Так как измерение выполняется компенсационным методом, то  $E_x = -U_{ac} = -(U_{ab} + U_{bc})$ , где  $E_{и} = -U_{ab}$  (измерительный преобразователь настроен на изопотенциальную точку),  $\Delta E_1$  будет автоматически скомпенсировано изменением  $U_{bc}$  за счёт изменения сопротивления  $R_t$ , контролирующего температуру раствора.

В микропроцессорных рН-метрах упрощается процесс настройки, поскольку градуировочные характеристики конкретной электродной системы вводятся в постоянную память микропроцессорного устройства, которое рассчитывает значение рН.

Наиболее распространенными в стране рН-метрами и являются рН-201 и рН-261. Их измерительные преобразователи имеют выходные сигналы по постоянному напряжению 0..50 мВ и ток-вый 0..5мА. Это обеспечивает возможность их работы в комплекте с автоматическими потенциометрами, устройствами регулиро-

вания и контроля. Прибор рН-201 имеет пять диапазонов измерения числа рН: 1; 2,5; 5; 10; 15, предельная допустимая погрешность составляет  $\pm 1\%$  диапазона измерения.

Микропроцессорные рН-метры широко представлены на рынке средств теплотехнического контроля многими зарубежными фирмами: Siemens; Foxboro; Honeywell; Jumo; Yokogawa и др., а также рядом российских фирм – «Техноприбор», «Взор».

## 10.5. УСТРОЙСТВА ПОДГОТОВКИ ПРОБЫ

При отборе пробы из многих точек водопарового или конденсатного тракта её параметры оказываются значительно выше тех, с которыми могут нормально работать датчики АХК (автоматического химического контроля) [21, 34, 52]. Например, для современных энергоблоков температура питательной воды может превышать 250°C, давление – 30 МПа. Для снижения параметров (температуры и давления) до допустимых используется так называемое устройство подготовки пробы (УПП), предназначенное для непрерывного снижения давления и (если требуется) температуры пробы, которая затем используется для автоматического и ручного анализа. Устройства подготовки пробы выпускаются в России фирмами «Техноприбор» [52], «Взор» [46], «Инэкотех» [47] и некоторыми другими.

Схема УПП приводится на рис. 10.8. Анализируемая вода входит в УПП через входной отсечной вентиль 1 и проходит через поверхностный теплообменник 3. В теплообменнике температура воды уменьшается до приемлемой (обычно это не более 50°C). Контроль температуры воды осуществляется датчиком температуры 4 (обычно это термометр сопротивления). Если температура анализируемой воды изначально не превышает приемлемый уровень, то может использоваться УПП без теплообменного аппарата, если температура анализируемой воды слишком высока (например, 560°C), то может устанавливаться УПП, в состав которого входят два поверхностных теплообменника. При исполнении с одним теплообменником температура пробы на входе в УПП обычно составляет около 250°C. Для увеличения точности под-

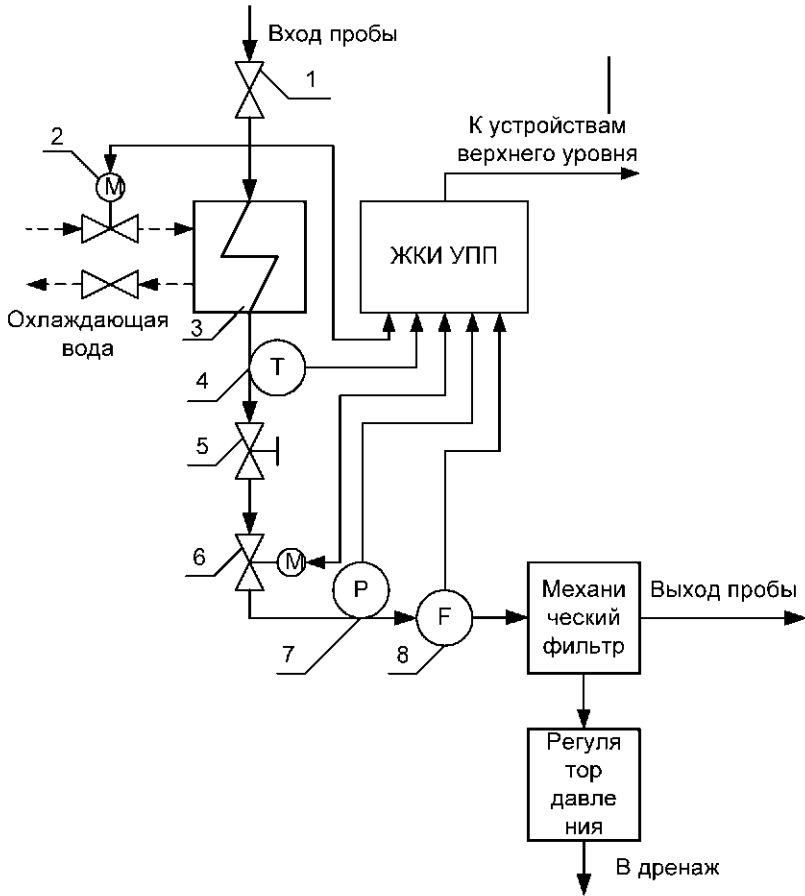
держания температуры пробы на выходе из УПП сейчас в состав этого устройства часто входит ПИД-регулятор температуры (часто встроены в исполнительный механизм 2).

Далее анализируемая вода проходит через регулирующий вентиль 5, где происходит снижение давления пробы, в данном случае степень снижения давления устанавливается вручную. Давление анализируемой среды на входе в УПП может достигать 32 МПа, давление на выходе обычно не превышает 0,3 МПа [46, 52].

Если температура пробы превышает некоторую уставку, то закрывается отсечной клапан 6, перекрывая подачу пробы к установленным далее устройствам АХК. На рисунке 10.8 этот клапан снабжен электроприводом, в некоторых УПП используются электромагнитные клапаны без электропривода. Далее установлены датчики давления 7 и расхода 8. Значение уставки по температуре задается через ЖКИ УПП, о котором подробнее сказано ниже.

На выходе из УПП установлен механический фильтр, задерживающий частицы крупнее 50–150 мкм (это значение разное у УПП разных производителей) [46, 52]. Также УПП может быть оснащено регулятором давления (показан на рис. 10.8), который обеспечивает необходимый расход на выходе из устройства. Из УПП также обычно есть возможность отобрать часть пробы для ручного анализа лабораторными приборами через специальный вентиль (на рисунке не показан). При установке УПП на стендах химического контроля необходимо установить значение расхода пробы на выходе из УПП таким, чтобы его было достаточно для работы всех приборов стенда.

Сейчас УПП, как правило, оснащаются специальным блоком, обозначенным на рис. 10.8 ЖКИ (жидкокристаллический индикатор). Это местная панель управления, которая занимается сбором информации со всех входящих в УПП приборов и преобразованием этой информации в цифровую форму и передачей её к устройствам верхнего уровня (например, к контроллеру). Также ЖКИ работает как местная панель оператора, т.е., занимается представлением оператору информации о параметрах пробы, работе УПП и т.д., и приемом команд от оператора. Например, в случае необходимости оператор может через ЖКИ УПП закрыть клапан 6 или изменить значение уставки по температуре, при которой клапан 6 закрывается, перекрывая подачу пробы далее.



**Рис. 10.8. Схема устройства подготовки пробы:**

1 – входной отсечной вентиль; 2 – регулирующий клапан с исполнительным механизмом на притоке охлаждающей воды; 3 – поверхностный теплообменник; 4 – датчик температуры; 5 – регулирующий вентиль; 6 – отсечной клапан с электроприводом; 7 – датчик давления; 8 – датчик расхода

ЖКИ УПП также имеет в своем составе запоминающее устройство, где может храниться информация о работе УПП за некоторый период времени. Например, в некоторых УПП на запоминающем устройстве хранится архив ошибок, который можно посмотреть на экране ЖКИ [52]. В архив заносятся все неисправ-



ности и отклонения от нормы в работе УПП (закрытие отсечного клапана 6 автоматически или вручную, снижение расхода пробы ниже определенного уровня (обычно 10 л/час), нарушение электропитания УПП или отдельных его узлов и т.д.). Все записи в архиве снабжаются метками времени, таким образом, в случае необходимости можно восстановить ход нештатной ситуации.

Вся упомянутая выше информация также в цифровом виде передается устройствам верхнего уровня. Во многих случаях для обмена данными используется интерфейс RS-485 и протокол обмена Modbus RTU. Также ЖКИ УПП может быть оснащен токовым выходом, выдающим один из унифицированных токовых сигналов. При этом, если УПП работает в составе СХТМ или АСУТП, и необходим обмен данными с устройствами верхнего уровня АСУТП, вывод информации на компьютер и т.д., то цифровой сигнал, как дающий возможность передать больше информации, предпочтительнее.

Необходимо отметить, что УПП разных производителей могут конструктивно отличаться, при этом имеют общий принцип действия.

## **10.6. СТЕНДЫ КОНТРОЛЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

В настоящее время к качеству рабочего тела энергоблока, сетевой воды, сточных вод и т.д. предъявляются достаточно жесткие требования, поэтому постоянно увеличивается количество измеряемых химических параметров, соответственно, увеличивается и количество измерительных приборов АХК. В этих условиях комплекты стенов контроля водно-химического режима оказываются удобным и надежным техническим решением [19, 52].

Стенд представляет собой вертикальную панель, на которой размещаются приборы АХК. Панель может быть односторонней (т.е., приборы размещаются с одной стороны) или (реже) двухсторонней. Как правило, на стенде устанавливают приборы одного производителя, некоторые производители, например, «Техноприбор» [52] проектируют и поставляют комплекты стенов в соответствии с запросом заказчика. К стенду по трубам подводятся

анализируемая проба и охлаждающая вода, отвод среды после анализа обычно осуществляется в технологическую канализацию. Также к стенду подводится электричество для питания установленных на нем устройств, может быть организована местная подсветка для удобства технического обслуживания.

Стенды обязательно оборудуют УПП, далее состав оборудования может различаться в зависимости от точки отбора пробы, контролируемой среды и т.д. Пример стенда контроля ВХР представлен на рис. 10.9. В данном случае анализируемая среда проходит УПП, после чего часть пробы может быть отобрана для ручного анализа, все остальное подается к установленным на стенде приборам (подача анализируемой воды показана на рис. 10.9 сплошной линией, пунктирной линией показаны информационные сигналы).

После УПП проба направляется на рН-метр, натриймер и кислородомер. На рисунке 10.9 показано техническое решение, когда все три указанных прибора АХК подключены к одному ЖКИ. При такой комплектации уменьшается количество необходимых ЖКИ (требуются не три устройства, а одно), соответственно, несколько уменьшается необходимое количество кабеля. Недостатком можно считать то, что при выходе ЖКИ из строя сразу три устройства АХК оказываются без связи с устройствами верхнего уровня АСУТП, таким образом, надежность несколько снижается. Далее установлены кондуктометр и кондуктометр с Н-катионитовой колонкой, в которой осуществляется предварительное Н-катионирование пробы для оценки её солесодержания. Как показано на рис. 10.9, кондуктометр, оснащенный Н-катионитовой колонкой и кондуктометр, не оснащенный ею, могут подключаться к одному ЖКИ.

После кондуктометров на стенде установлены прибор для измерения концентрации общего органического углерода (ТОС, total organic carbon (англ.) – общий органический углерод) и жесткомер. Стационарные анализаторы жесткости и общего органического углерода в настоящее время являются новыми перспективными разработками, выпускаются, например, [52].

Как показано на рис. 10.9, кабели для передачи информационных сигналов идут от ЖКИ к клеммной колодке (обозначена на рис.10.9 «КЛ»). Далее с от клеммной колодки информационные сигналы можно передать, например, на собирающий информацию контроллер и далее.

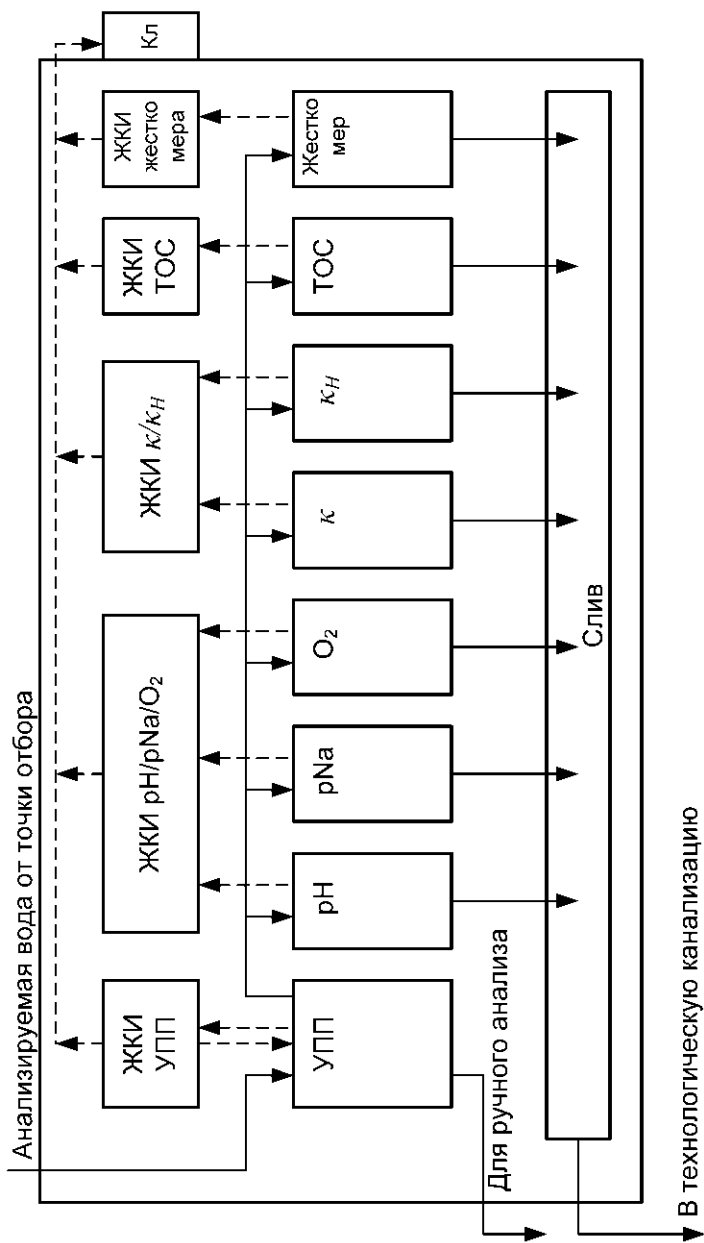


Рис. 10.9. Структурная схема стенда контроля водно-химического режима

Десятая глава была посвящена анализу состава жидких сред, что, как и анализ состава газовых сред, является сейчас достаточно актуальной темой по тем же причинам – ужесточение требований к охране окружающей среды, повышение параметров теплоносителя и, как следствие, ужесточение требований к надежности и безопасности работы оборудования. В начале главы рассматривались общие теоретические вопросы анализа состава жидких сред, далее рассматривались кондуктометрический и потенциометрический методы анализа, а также работающие на основании этих методов приборы – кондуктометры и рН-метры. Также в конце главы были рассмотрены устройства подготовки пробы (УПП) и стенды химического контроля, достаточно широко используемые на электростанциях в настоящее время.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Какие существуют методы анализа жидкостей?
2. Как связаны удельная электропроводность раствора и концентрация растворенного в нем вещества?
3. В каких единицах измеряется удельная электропроводность?
4. Какое уравнение устанавливает связь между удельной электропроводностью раствора и температурой?
5. В чем заключается явление поляризации электродов кондуктометра?
6. Что называется рН среды?
7. Каков рН кислых растворов? Щелочных растворов?
8. Запишите уравнение Нернста.
9. Какие требования предъявляются к измерительному электроду рН-метра? Из каких материалов его делают?
10. Нарисуйте электродную систему рН-метра с выносным электродом сравнения.
11. Что называется изопотенциальной точкой?
12. Каковы функции устройства подготовки пробы?
13. Каковы основные составные части устройства подготовки пробы?
14. В каких случаях применяют устройства подготовки пробы без теплообменников?
15. Какова функция отсечного клапана устройства подготовки пробы?
16. Каковы функции ЖКИ устройства подготовки пробы?
17. Каков состав стенда АХК?

# Глава 11. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ВЫБОРА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

## 11.1. Правила выбора технических средств измерения

### *11.1.1. Основные критерии выбора средств измерения*

Средства измерения автоматизации, используемые для управления технологическим процессом, должны быть выбраны технически грамотно и экономически обоснованно. Это означает, что технические средства должны обеспечивать решение поставленной задачи при минимальной стоимости покупки, эксплуатации и последующей модернизации. В соответствии с общим принципом решения многокритериальных задач минимальная стоимость владения должна выделяться в качестве основного критерия, а все технические требования выступать в роли ограничений.

Очевидно, что качественное решение задачи, в общем и целом, зависит от грамотного технического задания. Чтобы его составить требуется определить ряд параметров:

- физическая природа измеряемой величины;
- параметры контролируемой среды;
- условия окружающей среды;
- требования по энергетической совместимости;
- требования по конструктивной совместимости;
- требования по информационной совместимости;
- требования в части обработки, хранения и передачи информации;
- метрологические характеристики.

Не вызывает сомнения, что маловероятна ситуация, когда температуру предложат измерять с помощью преобразователя давления или наоборот, но применение преобразователей давления в качестве гидростатических уровнемеров вполне оправдано. Физическая природа измеряемой величины в любом случае явля-

ется основополагающим фактором. Например, для измерения плотности жидкости возможно применить средства измерения массы и объема, а возможно и применение плотномера, дополненного средствами измерения температуры и давления для введения погрешности в зависимости от параметров окружающей среды. В этом случае мы можем получить дополнительные полезные сигналы.

Возможные изменения значений параметров контролируемой среды важны для определения границ работоспособности средства измерения даже если нет задачи проводить метрологически достоверные измерения в этом диапазоне.

Среди этих параметров первоочередными являются:

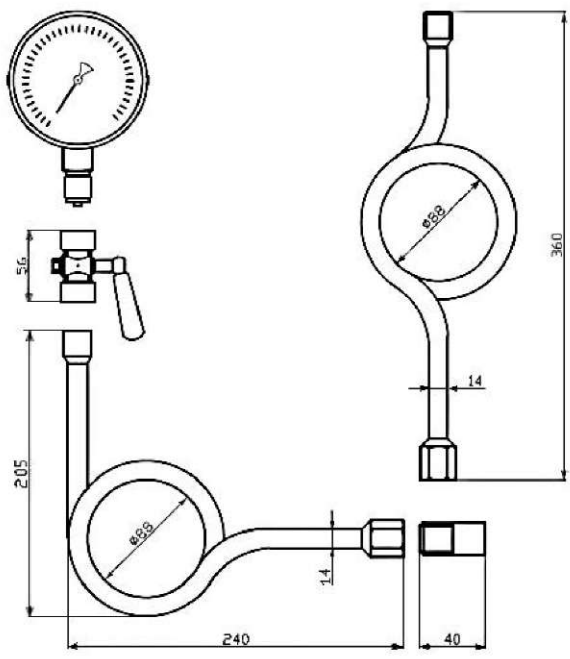
- температура среды: например, для измерения давления может потребоваться дополнительный радиатор для охлаждения среды, а если среда пар, то конденсационный сосуд (смотри рис. 11.1);

- давление среды: при анализе составов жидкостей и газов широко применяются стеклянные элементы и может понадобиться редуктор, чтобы снизить давление и не разрушить элементы конструкции (смотри рис. 11.1); а при измерении температуры необходимо определить необходимость защитной гильзы погружного элемента термометра, который может быть поврежден излишним давлением среды;

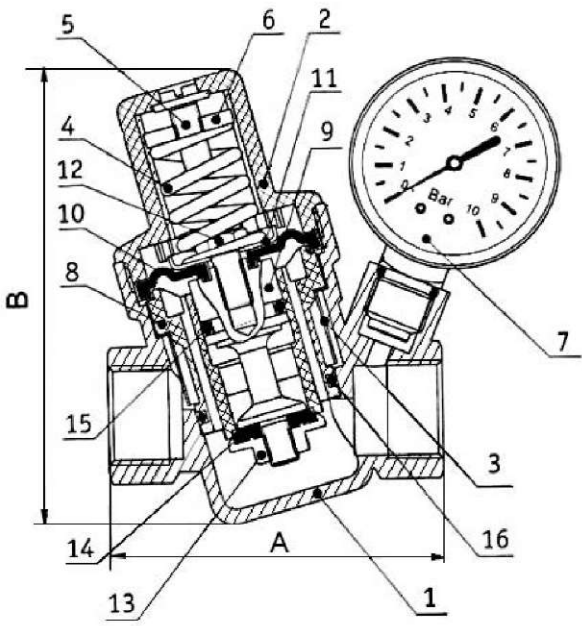
- агрессивность среды: очень часто средства измерений находятся в непосредственном контакте с измеряемой средой и при неправильном выборе материалов они могут быть повреждены: например, титановая защитная мембрана преобразователей давления, выполненных по технологии кремний на сапфире (КНС) плохо противостоит окислителям и необходимо применить разделительные мембраны или сосуды (смотри рис. 11.1).

Не вызывает сомнений и важность изучения возможных изменений условий окружающей среды, в рамках которых определяются следующие требования к средствам измерения:

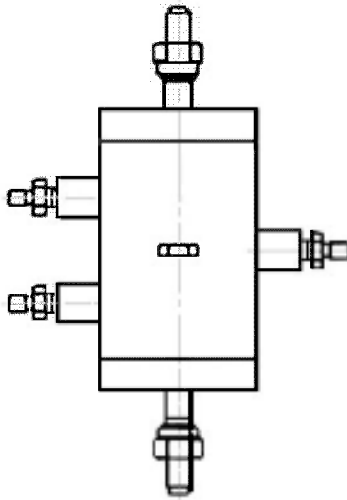
- климатическое исполнение (ГОСТ Р 52931-2008);
- устойчивость к воздействию влаги и пыли (ГОСТ 14254-96);
- сейсмостойкость (ГОСТ 30631);
- устойчивость к механическим воздействиям (ГОСТ 17516.1-90);
- коррозионная стойкость (ГОСТ 15150-69);



a)



б)



в)

**Рис. 11.1. Технологические устройства для защиты средств измерений от разрушительного воздействия контролируемой среды:**  
а) конденсационная трубка Перкинса (пароохладитель); б) редуктор давления; в) разделительные сосуды

- устойчивость к электромагнитным помехам (ГОСТ 32137-2013) и электромагнитная совместимость (ТР ТС 04/2011);
- возможность применения во взрывоопасных помещениях (ГОСТ 30852.0-2002 и ТР ТС 12/2011);
- электрическое сопротивление изоляции цепи питания.

Корректное определение всех вышеперечисленных факторов (в скобках приведены стандарты и регламенты, определяющие значения параметров), а также любых других факторов характерных для конкретного применения, позволит обеспечить высокую надежность измерительной системы.

В настоящее время основным источником энергии средств измерения является электричество. Тем не менее существует ряд приборов, где энергоснабжение организуется посредством давления управляющей среды: воздуха (пневматические) или жидкости (гидравлические). Это может быть необходимо в системах, где крайне важна искробезопасность.



Конструктивная совместимость изделия, как правило, состоит из двух составляющих: механическая и электрическая.

В части механической совместимости определяются: габаритные размеры; параметры резьбовых соединений; методы крепления. Для электрической совместимости важны: типы разъемов, типы и длины кабельных линий, параметры импеданса и сопротивления электрической изоляции.

Важно понимать, что, выдвигая те или иные требования, необходимо руководствоваться не только доступностью самих приборов, но также наличием инструментов для их монтажа, возможностью многократного использования. Многие производители предлагают преобразователи давления с трубной резьбой (обозначение типа G 3/4A), тогда как стандарт для промышленности России – метрическая резьба (обозначение M20x1,5).

Внешне они похожи, но при этом не взаимозаменяемы. Другой пример: большинство электрических разъемов обеспечивают требуемый уровень защиты от попадания влаги и пыли только при однократном использовании уплотнительных элементов и применения специализированных инструментов при подключении кабельных линий.

Среди других возможных ошибок – применение несоответствующего типа кабеля, что может привести к следующим проблемам: кабель окажется излишне жестким и вы не сможете его проложить в соответствии с проектом или не была учтена жильность кабеля, что приведет к невозможности правильно смонтировать его в электрическом разьеме и нарушит как герметичность соединения, так и параметры электрической схемы.

Вопрос информационной совместимости, а также требования в части обработки, хранения и передачи информации подробно освещен в главе, посвященной информационному обеспечению средств измерения. Основными критериями являются однотипность сигналов, их помехозащищенность, протяженность линий связи, необходимость в обработке и передаче информации.

На последнем этапе формирования технического задания на подбор средства измерения определяются непосредственно метрологические характеристики, которые подробно рассмотрены в соответствующем разделе.

Одним из непростых вопросов является выбор необходимого диапазона измерений, который может напрямую оказывать влияние на точность результатов. Рассмотрим несколько характерных примеров.

При выборе средств измерения давления, у которых, как правило, нормируется приведенная погрешность, долгое время руководствовались правилом: если технологический процесс не предполагает резких пульсаций и изменения давления контролируемой среды, то номинальное значение, определяемое технологическим процессом, должно соответствовать  $3/4$  диапазона измерений, в противном случае –  $2/3$ . Это обеспечивало минимизацию абсолютной и относительно погрешностей измерения с одной стороны и снижало риск перегрузки приборов с другой. При этом в последние годы во многих нормативных документах указывается, что при выборе шкалы манометра нужно руководствоваться условием того, что номинальное значение должно быть во второй трети шкалы либо, что максимальное давление не должно превышать двух третей максимального значения шкалы. Эти утверждения полностью противоречат предыдущей практике. Тем не менее не учитывать эти требования нельзя, а это приводит к снижению точности измерений примерно на 20%.

Другим примером являются расходомеры. Для этих приборов важную роль играет значение так называемого динамического диапазона: диапазона в котором нормируется погрешность (обеспечивается метрологическая достоверность результатов). Завышенный диапазон может создать ситуацию, что в ряде режимов контролируемый расход будет ниже минимально допустимого значения.

При измерении температуры с помощью термоэлектрических термометров нельзя забывать, что их предел основной допустимой погрешности может изменяться в зависимости от температуры контролируемой среды и при заявленном диапазоне от  $-200$  до  $1000^{\circ}\text{C}$  на каждом участке точность будет своя.

Для термометров сопротивления ситуация проще: погрешность нормируется по классу во всем диапазоне измерений, но нужно не забывать, что с расширением диапазона измерений увеличивается и стоимость.

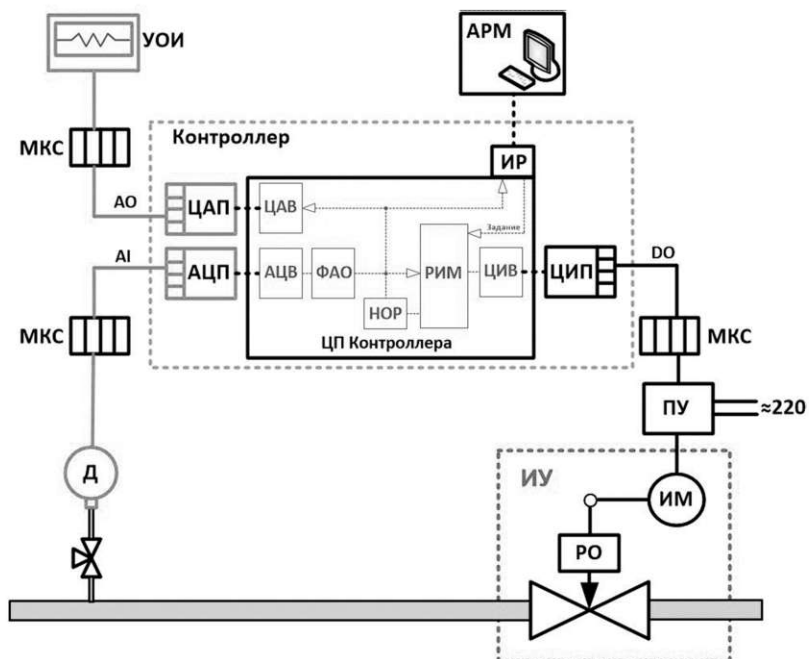
### *11.1.2. Определение требований к точности средств измерений*

Определение требуемых параметров точности средств измерений очень сложный и неоднозначный вопрос. В части случаев эти требования определены в различных стандартах, как государственных, так и отраслевых или корпоративных. Но ведь и в этом случае при разработке стандарта необходимо понимать какая требуется точность. Нередко руководствуются принципом: чем точнее, тем лучше, но это неправильно и безответственно. Всегда необходимо проводить анализ всей системы управления (измерения) и руководствоваться понятием адекватности точности измерений решаемой задаче.

Рассмотрим важность комплексного подхода к оценке точности работы всей системы на примере цифровой системы управления с электрическим исполнительным механизмом, показанной на рис. 11.2.

В связи с ростом скорости и непрерывности протекания процессов, усложнением процесса регулирования, развитием сложных алгоритмов, по которым производится управление технологическим процессом, исполнительное устройство должно отвечать все большим требованиям по снижению инерционности, скорости и точности позиционирования. В значительной степени выполнение этих требований стало возможным с развитием цифровых контуров управления. В них стала реальной беспрепятственная и помехоустойчивая работа канала регулирования с возможностью цифровой обработки сигналов.

Контур системы автоматического управления (САУ) представляет собой систему взаимодействующих между собой объекта управления и автоматического управляющего устройства (контроллера), а управление состоит в выработке команд, реализация которых обеспечивает целенаправленное изменение состояние этого объекта при соблюдении заранее обусловленных требований и ограничений. В процессе работы контроллер получает текущую информацию о цели управления, а также о текущем состоянии объекта и в соответствии с этой информацией формирует управляющее воздействие на объект так, чтобы была достигнута цель управления.

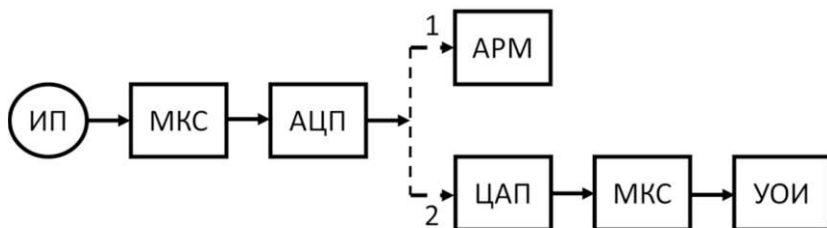


**Рис. 11.2. Контур системы автоматического управления:**  
 Д – измерительный преобразователь; МКС – модуль клеммных соединений; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦИП – цифро-импульсный преобразователь; УОИ – устройство отображения информации; АРМ – автоматизированное рабочее место; ПУ – пусковое устройство; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ИУ – исполнительное устройство; ЦП – центральный процессор; ИР – интерфейсный разъем; АЦВ – аналогово-цифровой ввод; ЦАВ – цифро-аналоговый вывод; ЦИВ – цифро-импульсный вывод; ФАО – формирователь аналоговый объектный; НОР – нуль-орган; РИМ – регулятор импульсный

На рисунке 10.3 измеряемый параметр регулируемой величины, характеризующий текущее состояние объекта управления, от датчика (Д) в виде унифицированного токового сигнала поступает на модуль аналогово-цифрового преобразования (АЦП) посредством подключения физической цепи с помощью модуля клеммных соединений (МКС). Преобразованный в АЦП цифровой сигнал измеренного параметра по системной шине данных

поступает непосредственно в центральный процессор контроллера (ЦП), где происходит формирование математического закона регулирования, а также обмен информацией с подсистемами АСУТП. Алгоритм широтно-импульсной модуляции, исходя из текущего состояния объекта, формирует управляющее воздействие, которое с помощью модуля цифро-импульсного преобразования (ЦИП) преобразуется в последовательные импульсы различной длительности и скважности. Далее управляющий сигнал постоянного напряжения посредством физического соединения МКС по кабельным линиям связи подается на пусковое устройство (ПУ), необходимое для коммутации силовых цепей с управляющими, и затем с помощью исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО) происходит непосредственное воздействие на объект управления.

В настоящее время при выполнении пуско-наладочных работ систем управления АСУ ТП особое внимание уделяется их измерительной части. В контуре системы автоматического управления измерительный канал (см. рис. 11.3) представлен от измерительного преобразователя технологического параметра до места представления его значения.



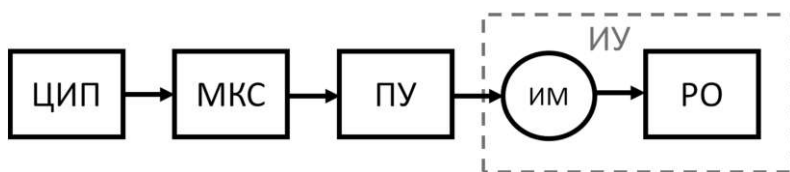
**Рис. 11.3. Измерительный канал**

Нормативно-техническая документация государственного и отраслевого уровня регламентирует требования к измерительным каналам систем АСУ ТП, определяя измерительный канал как конструктивно или функционально выделяемую часть, выполняющую законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения результата ее измерений, выражаемого числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового

сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины.

В соответствии с положениями Федерального закона № 102-ФЗ для государственного регулирования в области обеспечения единства измерений осуществляются испытания в целях утверждения типа средств измерений с последующей выдачей свидетельства и поверка средств измерений на подтверждение метрологических характеристик. При этом измерительный канал как часть измерительной системы является разновидностью средств измерений и на него распространяются все общие требования к средствам измерений. Повышение точности измерений в промышленности является одним из существенных резервов повышения качества продукции и эффективности производства.

Однако, измерительный канал, обеспечивающий допустимую погрешность и, следовательно, требуемую точность показаний, является лишь одной из составляющих контура системы управления, выполняющего законченную функцию. Необходимо помнить, что вторая, не менее важная часть контура – это канал управляющего воздействия. После формирования математическим алгоритмом управляющих воздействий в данной части контура системы управления осуществляется преобразование и передача управляющих воздействий на технологический объект с целью поддержания каких-либо параметров на заданном уровне.



**Рис. 11.4. Канал управляющего воздействия**

В канале управляющего воздействия системы автоматического управления (см. рис. 11.4) за преобразование цифрового управляющего воздействия в дискретный сигнал отвечает выходной модуль устройства связи с объектом (в данном случае ЦИП), а за точность их реализации – исполнительное устройство (ИУ).

При этом основным элементом канала управляющего воздействия и частью ИУ, непосредственно взаимодействующего с технологическим процессом и с помощью которого назначается заданный режим работы системы, является регулирующий орган (РО). Роль регулирующих органов в составе контуров регулирования тепловых схем весьма значительна. Выполняя команду системы автоматизации в составе контура управления, регулирующий орган может вносить самую весомую часть возмущений и колебаний в процесс. Регулирующий орган влияет на снижение уровня переходных процессов и на совершенство регулирования посредством устранения возмущений и приближения насколько возможно к командному сигналу.

Исходя из требований к управлению технологическим участком, производится выбор необходимого регулирующего органа в процессе выполнения расчета, т.е. из ряда серийно изготавливаемых регулирующих органов выбирается конкретный типоразмер, имеющий необходимый диаметр условного (присоединительного) прохода, нужную пропускную способность и пропускную характеристику. Пригодность принимаемого регулирующего органа по другим характеристикам (рабочему давлению и температуре, материалу деталей, соприкасающихся с протекающей средой и т.п.) должна выявляться по каталогам и другим действующим информационным материалам и правилам.

Регулирующий орган приводится в движение исполнительным механизмом посредством кинематической связи (КС) с помощью прямого соединения или же тяг и рычагов. Согласно расчёту перестановочного усилия определяется вращающий момент регулирующего устройства и по полученному значению подбирается исполнительный механизм и требуемая кинематическая схема связи устройств. На данном этапе возникает проблема подбора механизма, типа и точности его сочленения с регулирующим органом. Правильный выбор и расчет исполнительного устройства имеет первостепенное значение, поскольку эти устройства являются конечными в цепях систем автоматического управления любой сложности, вследствие чего, погрешности в работе ИУ непосредственно влияют на качество протекания автоматизируемого процесса.

Для оценки общей точности системы автоматического управления следует также брать в расчёт и погрешность передачи канала управляющего воздействия (КУВ).

Предположим, что влияющие факторы, которые можно представить как случайные величины, имеют равномерное распределение, что в целом соответствует их физической природе. В этом случае суммарная неопределенность канала измерительного воздействия может быть определена следующим образом:

$$\delta_{\text{КУВ}} = \pm K_{\text{Н}} \cdot \sigma[\delta_{\xi}],$$

где  $K_{\text{Н}}$  – коэффициент, зависящий от вида закона распределения погрешности измеряемой величины и выбранного значения доверительной вероятности  $P$ ,  $\sigma[\delta_{\xi}]$  – среднеквадратическое отклонение неопределенности измерений канала.

Очевидно, что для уравнивания вклада погрешности канала управляющего воздействия и погрешности измерительного канала в общую точность регулирования необходимо ввести понятие весового коэффициента. Тогда, формула погрешности канала управляющего воздействия примет вид:

$$\delta_{\text{КУВ}} = \pm K_{\text{Н}} \cdot \sigma[\delta_{\xi}] \cdot G,$$

где  $G$  – коэффициент, уравнивающий вклад погрешности измерительного канала и погрешности канала управляющего воздействия в общую точность регулирования в рамках одного контура управления.

Тогда для канала управляющего воздействия (смотри рисунок) СКО вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma[\delta_{\xi}] = \pm \sqrt{\frac{\delta_{\text{ЦИП}}^2 + \delta_{\text{МКС}}^2 + \delta_{\text{ЛС}}^2 + \delta_{\text{ПУ}}^2 + \delta_{\text{ИУ}}^2}{K_p}},$$

где  $K_p$  – квантиль распределения, который для равномерного распределения равен  $\sqrt{3}$ , а  $\delta_{\text{ЛС}}$  – погрешность линий связи.

Основная часть погрешности канала управляющего воздействия вносится как электрическими, так и механическими звеньями исполнительного устройства. Следует отметить, что в настоящее время не существует нормативно-технической документации,



регламентирующей точность «отработки» управляющего воздействия исполнительным устройством. Несмотря на это, в ГОСТ 14691-69 «Устройства исполнительные для систем автоматического регулирования. Термины» фигурирует понятие основной приведенной погрешности исполнительного устройства и говорится о том, что это абсолютная величина отношения наибольшей разности действительного и приведенного хода к величине условного хода, выраженная в процентах:

$$\delta_{иу} = \left| \frac{S_{д} - S_{п}}{S_{у}} \right|_{\max} \cdot 100\%.$$

Неопределенность исполнительного устройства можно также представить как сумму погрешностей его составных звеньев:

$$\delta_{иу} = \delta_{им} + \delta_{ро} + \delta_{кс}.$$

где  $\delta_{им}$  – неопределенность исполнительного механизма;  $\delta_{ро}$  – неопределенность регулирующего органа;  $\delta_{кс}$  – неопределенность кинематической связи.

Неопределенность исполнительного механизма характеризуется люфтом и выбегом выходного вала исполнительного механизма.

Люфт выходного вала представляет собой разность положений выходного органа исполнительного механизма при приложении к нему момента (силы) в прямом и обратном направлениях, работающего с установившейся скоростью, с момента включения до полной остановки. Люфт характеризуется свободным ходом между сопряженными механическими элементами системы управления, обычно связанными с вращением. Величина люфта определяет степень поворота элемента управления, которая не приводит к изменениям в управляемой системе. Чем выше люфт, тем больше воздействия необходимо применить к элементу управления для произведения хоть какого-то изменения в объекте управления. Люфт является нежелательным явлением, к тому же увеличивающимся со временем из-за износа трущихся деталей.

Выбег выходного вала – это перемещение вала исполнительного механизма по инерции после прекращения действия управляющего сигнала. Выражается в процентах полного хода выходного вала в период времени с момента включения до полной остановки.

Помимо люфта и выбега выходного вала, которые оказывают непосредственное влияние на точность регулирования, имеются и другие, малоизученные и количественно не регламентируемые в нормативных документах величины, влияющие на работу исполнительного механизма в целом. Как пример, выдержка из руководства по эксплуатации на механизмы исполнительные электрические однопоротные МЭО(Ф)-08(К), приведенная в табл. 11.1.

Таблица 11.1

### Некоторые характеристики МЭО (Ф)-08(X)

Требования к работе исполнительного механизма	
Люфт выходного вала при нагрузке, равной (5...6) % номинального значения:	не более 0,75°
Выбег выходного вала, в процентах полного хода, при моменте на выходном валу в пределах от номинального противодействующего до 0,5 от номинального сопутствующего:	– не более 1 % для механизмов с номинальным временем полного хода менее 63 с; – не более 0,5 % для механизмов с номинальным временем полного хода 63 с и более
Отклонение действительного времени полного хода от номинального значения при номинальном противодействующем моменте	не более 10 %
Требования к работе датчика положения исполнительного механизма	
Нелинейность выходного сигнала токового датчика положения	не более 2,5 % от диапазона
Гистерезис выходного сигнала датчика положения, приведенный к выходному валу механизма	не более 1,5 % диапазона
Требования к работе выключателей блока сигнализации положения	
Дифференциальный ход выключателей блока сигнализации положения, приведенный к выходному валу механизма	не более 4% полного хода

Количественные требования к точности работы исполнительных механизмов в общем виде задаются в ГОСТ 7192-89 «Механизмы исполнительные электрические постоянной скоро-

сти ГСП. Общие технические условия» и требуют классификации по среде регулируемого параметра и важности системы управления в рамках всей электростанции, что необходимо для повышения эффективности работы технологического процесса. При этом данный стандарт не распространяется на механизмы, предназначенные для перемещения запорных и отсечных органов, а также для систем безопасности атомных электростанций. Для АЭС разработан другой нормативный документ: НП-068-05 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования», который в свою очередь вообще никак не регламентирует количественные требования к люфтам и выбегам исполнительных механизмов.

Погрешность регулирующего органа  $\delta_{PO}$  характеризуется собственными характеристиками РО, такими как гистерезис и мертвая зона. Залипания, связанные с особенностями трения между затвором и уплотняющей поверхностью, а также суммой трений между штоком и сальником, дополнительно повышают трение. Все приведенные проблемы влияют на пропускную способность или расходную характеристику регулирующего органа в целом. При этом расходная характеристика регулирующего органа выражает функциональную зависимость изменения пропускной способности регулирующего органа от перемещения (или угла поворота) затвора:

$$K_v = \varphi(S).$$

Расходные характеристики, как правило приведены в эксплуатационной документации, но их необходимо определять также после капитального ремонта арматуры. Увеличенный пропуск уменьшает диапазон регулирования, а также затрудняет поддержание регулируемых органов в горячем резерве при открытой запорной арматуре (или при ее отсутствии).

Правильный выбор регулирующего органа в зависимости от условий протекания технологического процесса, позволяет создать оптимальные условия для точности различных контуров регулирования. К примеру, для обеспечения точности регулирования медленно протекающих процессов требуется, чтобы РО имел как можно меньшую мертвую зону и высокую точность позицио-

нирования, тогда как для быстро протекающих процессов требуют РО с малым гистерезисом и высоким быстродействием. При быстрых процессах низкое время отклика является наиболее критичным для характеристики времени запаздывания и инерционности. Учитывая эти факторы, удастся повысить точность регулирования.

Определение погрешности кинематической связи  $\delta_{КС}$  звеньев сочленения исполнительного механизма и регулирующего органа определяется в теории точности механизмов. Выходные звенья движутся практически с некоторыми отклонениями от теоретически рассчитанного движения или с погрешностями. Разница положений ведомых звеньев элементов кинематических пар действительного и соответствующего ему идеального (расчётного) механизмов при одинаковых положениях ведущих звеньев называют ошибкой положения механизма, а разницу перемещений ведомых звеньев действительного и идеального механизмов при одинаковых перемещениях ведущих звеньев – ошибкой перемещения механизма. Это определяется взаимным расположением в нем элементов кинематических пар, соединяющих его с соседними звеньями. Отклонения расположений в звене элементов кинематических пар от идеальных положений и отклонений существующих поверхностей элементов от заданных геометрических форм называют первичными ошибками механизма.

Одна из причин возникновения погрешностей кроется в технологии изготовления звеньев механизмов и обусловлена разбросом параметров и погрешностями измерительных и рабочих инструментов, погрешностями станочного оборудования и т.д. Безусловно, допустимые отклонения размеров деталей регламентируются системой допусков, но в дальнейшем сочетание деталей различных размеров при формировании из них звеньев, а также при сборке звеньев в механизмы может дать в сумме отклонение, по своей величине, выходящее за пределы поля допуска. Данные отклонения необходимо проверять на месте, при непосредственной сборке сочленения исполнительного механизма и регулирующего органа для дальнейшей совместной работы.

Другая причина возникновения погрешностей кинематической связи – деформация звеньев механизмов под действием статических и динамических нагрузок, изнашивание деталей.

Данная погрешность относится к классу динамических погрешностей, и предугадать ее, как и учесть заранее, довольно проблематично.

В процессе наладки регулирующего устройства вкупе с исполнительным механизмом для обеспечения длительной работоспособности и для устранения видимых неточностей передачи управляющего воздействия в алгоритмах системы регулирования приходится ослаблять настройки, увеличивая зону нечувствительности и вводя другие нелинейные составляющие, что в свою очередь приводит к вынужденной робастности системы. От этого страдает точность «отработки» сигнала звеном канала управляющего воздействия, что негативно сказывается на качестве регулирования в целом и применимо только для стационарных или медленных процессов.

Совершенствование любого промышленного предприятия, повышение производительности его оборудования, улучшение технологии производственных процессов и качества продукции невозможно без хорошо налаженного метрологического обеспечения. Как показывает практика, из-за недостаточности количественных требований к точности регулирования технологических процессов, параметры настройки систем подбираются исходя из многолетнего опыта наладки, а качество регулирования обуславливается в основном использованием высокоточных первичных измерительных преобразователей.

Одним из главных направлений повышения точности регулирования является разработка и внедрение методов государственного контроля каналов управляющего воздействия с закреплением требований к их точности в нормативно-технической документации, а также проведением обязательных испытаний для исполнительных устройств (возможно, с разработкой эталонного исполнительного механизма) с подтверждением точности их работы, аналогичных испытаниям в целях утверждения типа и поверке для средств измерений.

Без этого сколь угодно высокая точность средств измерений может быть легко потеряна в низкой точности исполнительных механизмов.

### *11.1.3. Оптимизация приборного парка средств измерений*

Как уже было отмечено, технические средства должны обеспечивать решение поставленной задачи при минимальной стоимости покупки, эксплуатации и последующей модернизации. Таким образом при выборе средств измерений нам необходимо решить многокритериальную задачу. Как известно наилучшим методом решения подобных задач является выделение основного критерия и введение всех остальных критериев в виде ограничений. Далеко не всегда очевидно, что основным критерием инженерной задачи должна быть экономическая эффективность решения, но тем не менее это единственная возможность создания высококонкурентного продукта. В этой части особое значение отводится грамотной подготовке технического задания – тех самых ограничений, которые обеспечат саму возможность решения задачи. Этому вопросу были посвящены предыдущие параграфы раздела. При определении общей стоимости владения прибором следует учитывать следующие факторы:

- планируемый срок эксплуатации;
- начальная стоимость изделия;
- стоимость монтажа;
- стоимость регулярного технического обслуживания;
- энергопотребление;
- стоимость эксплуатации (например расход реагентов в аналитических средствах измерения состава жидкостей и газов).

При этом важно учитывать, что на предприятии не один прибор, а, как правило, десятки, сотни или даже тысячи различных средств измерений. В этом случае необходимо говорить об управлении приборным парком в целом, а для этого необходимо разрабатывать политику предприятия в части выбора средств измерений, в которой целесообразно следовать следующим принципам:

- применение однотипных приборов;
- применение многоточечных средств измерения, особенно при выборе вторичных приборов;
- применение многопредельных приборов;
- применение цифровых приборов с возможностью удаленной настройки;

- доступность запасных частей;
- применение средств измерения с максимально допустимым межповерочным интервалом.

Необходимо помнить, что предпочтение следует отдавать надежным поставщикам, которые обеспечивают ответственность и взаимозаменяемость приборов в течение всего предполагаемого срока эксплуатации. Также нерационально использовать приборы только одной марки – это создаст риски невозможности замены прибора в случае проблем у поставщика. При этом большое разнообразие поставщиков также нецелесообразно, поскольку несет дополнительные затраты на работу с ними. Разумно выбирать одного основного поставщика и одного дополнительного с максимальной взаимозаменяемостью приборов.

## **11.2. Функциональные схемы технического контроля**

Функциональная схема автоматизации (ФСА) или функциональная схема теплотехнического контроля (ФСТК) — это основной техникий документ проекта системы автоматизации или контроля, определяющий:

- структуру системы управления технологическим процессом;
- оснащение технологического оборудования средствами автоматизации и теплотехнического контроля.

Функциональная схема автоматизации или теплотехнического контроля – это чертёж, на котором схематически условными обозначениями изображены:

- технологические аппараты (колонны, теплообменники и т.д.);
- машины (насосы, компрессоры и т.п.);
- трубопроводы;
- средства автоматизации (приборы, регуляторы, клапаны, вычислительные устройства, элементы телемеханики);
- связи между перечисленными элементами.

При создании функциональной схемы определяют:

- целесообразный уровень автоматизации технологического процесса;

- принципы организации контроля и управления технологическим процессом;
- технологическое оборудование, управляемое автоматически, дистанционно или в обоих режимах по заданию оператора;
- перечень и значения контролируемых и регулируемых параметров;
- методы контроля, законы регулирования и управления;
- объем автоматических защит и блокировок автономных схем управления технологическими агрегатами;
- комплект технических средств автоматизации, вид энергии для передачи информации;
- места размещения средств измерений и автоматизации.

Существуют различные методики построения функциональных схем автоматизации. Долгое время основным документом являлся отраслевой стандарт, который предполагал условные обозначения приборов и средств автоматизации, применяемых в схемах, включают графические, буквенные и цифровые обозначения. В верхней части графического обозначения наносят буквенные обозначения измеряемой величины и функционального признака прибора, определяющего его назначение. В нижней части графического обозначения наносят цифровое (позиционное) обозначение прибора или комплекта средств автоматизации. В настоящее время построение схем описанного вида регламентируется ГОСТ 21.208-2013 [ГОСТ], основные положения которого будут кратко изложены ниже.

Основным недостатком этой методики является ограниченная возможность определения функционала каждого прибора и невозможность присвоения индивидуальной кодировки для каждого средства автоматического измерения и контроля, применяемого на объекте управления – в этом случае каждый элемент технологического оборудования имел собственное обозначение.

В настоящее время в тепловой энергетике при маркировке энергетического оборудования, технических и программных средств АСУТП используются разнообразные принципы кодировки (практически на каждом энергообъекте свой принцип). В то же время, в связи с широким внедрением в организационную деятельность и технологические процессы автоматизированных процедур (учета, управления, сбора и обработки информации и т.д.),



построенных с применением баз данных, реализованные способы кодировки значительно затрудняют автоматизацию из-за невозможности прямого использования существующих маркировок в программах управления базами данных.

Устранить этот недостаток можно путем применения систематизированной системы маркировки, в которой наиболее полно учтены характерные признаки кодируемого оборудования и средств, используемых в АСУТП.

Одной из таких систем кодирования является система Kraftwerk Kennzeichen System [41] – система кодирования для электростанций, сокращенное название – система KKS (далее по тексту – KKS), разработанная немецким объединением промышленников (VGB), являющаяся держателем авторских прав. KKS используется западными фирмами уже 40 лет, а сейчас применяется и в России [39, 41].

В отечественной энергетике внедрение KKS началось в конце девяностых годов прошлого века при активном участии Всероссийского теплотехнического института (ВТИ) для вновь вводимых или реконструируемых АСУТП и других систем управления.

Стандартная система предполагала обозначение следующих элементов:

- технологическое оборудование;
- исполнительные механизмы;
- регулирующие и запорные органы;
- точки измерения;
- монтажные единицы;
- устройства автоматизации;
- здания и сооружения.

Система KKS в дополнение предполагает следующие обозначения:

- алгоритмы обработки измеряемых технологических параметров;
- программы как технологического назначения, так и расчета ТЭП;
- водные, выходные и промежуточные сигналы этих алгоритмов и программ;
- видеопрограммы всех уровней, отображаемые на видеотерминалах;
- кабели.

### 11.3. Пример построения функциональной схемы теплотехнического контроля по ГОСТу 21.208-2013












Согласно ГОСТ 21.208-2013 [8], объект контроля или управления (в теплоэнергетике это может быть, например, теплообменный аппарат, котел, турбина и т.д.), который представляется обычно на чертеже в виде условных обозначений, при этом некоторые особенности объекта (конструктивные размеры, кабели питания и т.д.) могут не показываться. На объекте или рядом с ним показывают технические средства контроля и управления, при этом также опускаются подробности (например, конструктивные особенности, цвет, блоки питания и т.д.). Технические средства показывают в виде кружочка диаметром 10 мм, в верхней части которого указывается буквенное обозначение, кодирующее измеряемую величину и функции, выполняемые прибором. Код записывается заглавными буквами латинского алфавита, первая буква (или две первых буквы) обозначают измеряемую величину, все остальные – выполняемые прибором функции.




В нижней части кружочка записывается номер прибора, например, 4-2. При этом первое число – это номер измерительной цепочки, второе – номер прибора в цепочке. Обычно нумерация идет от первичного прибора, то есть, если, например, температура измеряется термопарой, от которой сигнал идет на нормирующий преобразователь, а затем – на цифровой индикатор, то номер термопары будет 1-1, нормирующего преобразователя – 1-2, а цифрового индикатора – 1-3.

Если прибор установлен по месту (то есть прямо на контролируемом объекте, как, например, сужающее устройство расходомера или термопара) или рядом, как, например, дифманометр-расходомер, то кружочек не перечеркивается прямой линией по горизонтальному диаметру. Если прибор установлен на щите или пульте управления, в шкафу и т.д., то он перечеркивается. Некоторые обозначения приборов из ГОСТ 21.208-2013 приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

## Приборы и обозначения из ГОСТ 21-208.2013

Наименование	Условное обозначение на чертеже
Первичный измерительный преобразователь (или чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту. Например, это может быть термоэлектрический преобразователь (термопара), термопреобразователь сопротивления или телескоп пирометра	
Прибор для измерения температуры показывающий (например, индикатор), установленный на щите	
Прибор для измерения температуры бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	
Прибор для измерения температуры регистрирующий и регулирующий, установленный на щите. Примером может служить, например, измеритель-регулятор ТРМ 151 производства фирмы Овен и т.д.	
Регулятор (или контроллер) температуры бесшкальный, установленный по месту	
Прибор для измерения давления или разрежения бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. Примером может служить, например, манометр с тензопреобразователем	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту	
Прибор для измерения расхода бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. Примером может служить дифманометр-расходомер	
Прибор для измерения расхода интегрирующий, установленный по месту. Также такие приборы называются счетчиками количества или просто счетчиками	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения уровня, установленный по месту	
Прибор для измерения уровня бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. Примером может служить дифманометр-уровнемер	

Наименование	Условное обозначение на чертеже
Прибор для измерения уровня показывающий, с контактным устройством, установленный на щите. Буквы Н и L, показанные справа над и под кружочком обозначают верхнюю (Н) и нижнюю (L) уставки по уровню	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения качества продукта, установленный по месту. Например, датчик рН-метра (об этом говорит обозначение рН справа над кружочком)	
Прибор для измерения качества продукта показывающий, установленный по месту. В данном случае, это кислородомер с индикатором, об этом говорит обозначение O <sub>2</sub> справа над кружочком	

На рисунке 11.5 представлен фрагмент функциональной схемы теплотехнического контроля теплового энергоблока (на схеме показана группа ПВД), выполненной по ГОСТ 21.208-2013. Рассмотрим для примера группу приборов под номером 1. Номером 1.1 на рис. 11.5 обозначено сужающее устройство для измерения расхода питательной воды по перепаду давления. В данном случае 1.1 – это диафрагма. Далее линия связи, чтобы не загромождать чертеж, обрывается, разрыв обозначается «1» (соответственно, разрыв следующей линии связи будет обозначаться «2», затем – «3» и т.д.).

Далее группа приборов, измеряющая расход питательной воды на выходе из группы ПВД (и на входе в котел, соответственно) показана в таблице, которая обычно располагается в нижней части того листа, на котором приводится функциональная схема теплотехнического контроля. Фрагмент такой таблицы показан на рис. 11.6. В данном случае от 1-1 сигнал поступает на 1-2, здесь это манометр с унифицированным токовым выходом 4-20 мА, установленный по месту, т.е., в непосредственной близости от трубопровода или прямо на нем. Следующий прибор – 1-3 – это установленный на блочном щите управления показывающий прибор, в данном случае он должен быть снабжен функцией извлечения корня, которая может быть реализована, например, программным способом. От 1-3 сигнал поступает в программно-технический комплекс (ПТК), обычно – через входящий в состав этого ПТК контроллер.

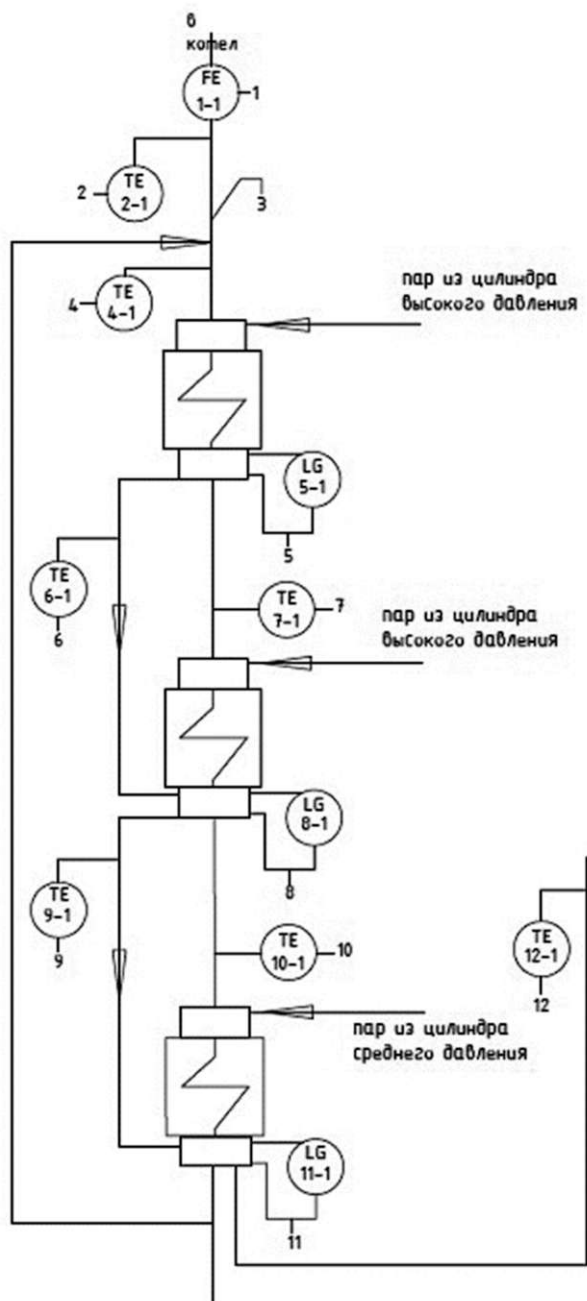
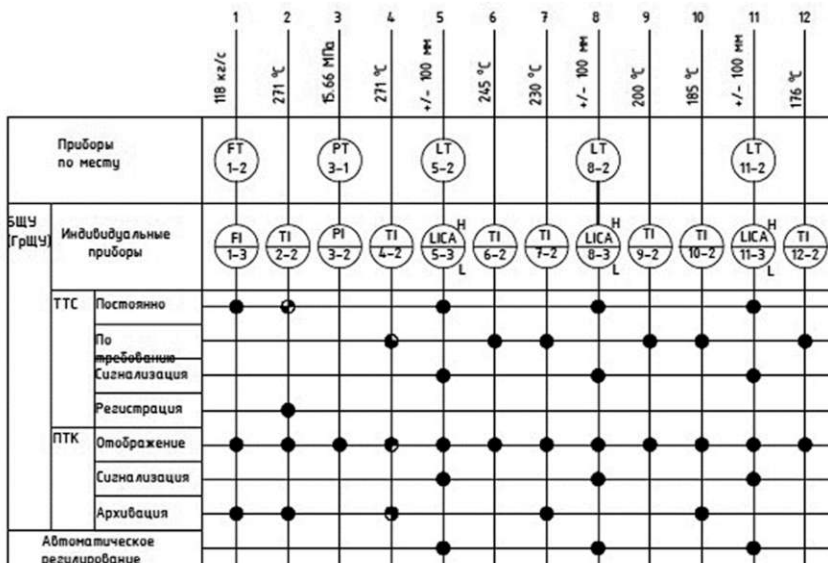


Рис. 11.5. Фрагмент схемы теплотехнического контроля теплового энергоблока, выполненный по ГОСТ 21.208-2013



**Рис. 11.6. Фрагмент схемы теплотехнического контроля теплового энергоблока, выполненный по ГОСТ 21.208-2013**

Аналогично, 2-1 на рис. 11.5 – это датчик температуры, например, термоэлектрический преобразователь, прибор 2-2, показанный на рис. 11.6 – это показывающий прибор, например, цифровой индикатор. После 2-2 сигнал идет в ПТК. Место разрыва линии связи между приборами нумеруется «2».

Числа, показанные на рис. 11.6 слева от линии связи – это номинальное значение измеряемого параметра и единицы его измерения. Здесь необходимо отметить, что в ряде случаев (например, у линий связи 5 или 8) в качестве единиц измерения указаны внесистемные единицы или производные единиц системы СИ (в данном случае, мм), поскольку на производстве сейчас применяются именно они.

В графу «Приборы по месту» на рис. 11.6 вносятся приборы, установленные по месту. Непосредственно на оборудовании обычно показывают такие приборы как сужающие устройства, датчики температуры, конденсационные и уравнильные сосуды, остальные показывают в таблице, чтобы не загромождать поле чертежа. Приборы, установленные в других местах, вносятся в соответствующие графы, например, на рис. 11.6 это «БЩУ. Индивидуальные приборы» (БЩУ – это блочный щит управления).

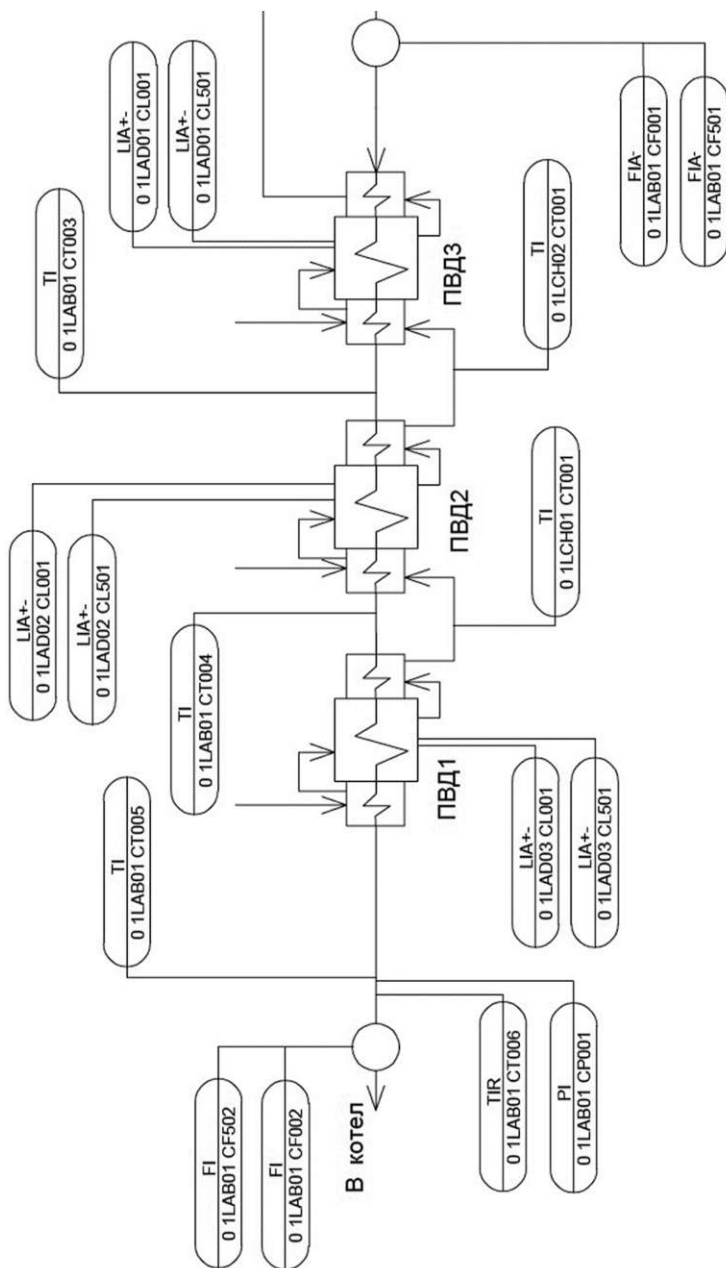


Рис. 11.7. Фрагмент схемы теплотехнического контроля участка теплового энергоблока, выполненный по системе ККС

Количество и наименования граф могут изменяться в зависимости от конкретной ситуации на предприятии, например, может быть графа «Шкаф пускателей» или «Стойка нормирующих преобразователей» (если они есть). Функции ПТК и системы сигнализации (ТТС) показываются в соответствующих графах, наименования и количество граф также могут меняться. Если данный сигнал задействован в выполнении какой-либо функции, то на месте пересечения линии связи от сигнала и тонкой линии в соответствующей графе ставится жирная точка. Для сравнения на рис. 11.7 показан фрагмент схемы теплотехнического контроля того же участка энергоблока, выполненный по системе KKS. В данном случае, например; прибор, закодированный как 0 1LAB01 CF502 – это первичный преобразователь расходомера, осредняющая напорная трубка, а прибор, закодированный как 0 1LAB01 CF002 – это измерительный преобразователь разности давлений.

Данная глава была посвящена таким важным вопросам, как выбор измерительного оборудования, основные критерии этого выбора и требования к точности приборов. Также в главе рассматривались вопросы оптимизации приборного парка средств измерений и построения функциональных схем автоматизации и (в основном) теплотехнического контроля по ГОСТ 21.208-2013 и системе KKS.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что называется функциональной схемой теплотехнического контроля и автоматизации?
2. Какие факторы учитываются при выборе измерительного оборудования?
3. Поясните, что называется конструктивной совместимостью изделий.
4. Каковы основные составляющие простейшей системы автоматического управления?
5. Каковы основные составляющие измерительного канала?
6. Как определить суммарную неопределенность измерительного канала?
7. Чем характеризуется неопределенность исполнительного механизма?
8. Какие факторы учитываются при определении общей стоимости владения прибором?
9. Что изображают на функциональной схеме теплотехнического контроля и автоматизации?
10. Что называется системой KKS? Для чего она применяется?



## **Глава 12. ПЕРЕДАЧА, ХРАНЕНИЕ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ**

### **12.1. Информативные параметры выходных сигналов средств измерения**

В предыдущих главах уже затрагивался вопрос об информативных параметрах выходных сигналов средств измерения и протоколах передачи данных. Эта тема является крайней важной на всех этапах жизненного цикла любого средства измерения от проектирования до эксплуатации и подтверждения метрологических характеристик.

Естественными сигналами измерительных преобразователей называют те сигналы, которые появляются непосредственно на выходе чувствительных элементов или сенсоров первичных преобразователей. Их разнообразие (рис. 12.1) может быть очень большим, а их дальнейшее использование требует применения измерительных преобразователей.

С целью унификации и упрощения применения приборов в крупных автоматизированных системах управления был разработан класс приборов, получивших название нормирующих преобразователей или преобразователей с унифицированным выходным сигналом. Их задача – преобразование естественных выходных сигналов в унифицированные. На рисунке 12.2 показано, как можно подключить первичные преобразователи различных физико-химических свойств к одному многоканальному вторичному прибору с применением нормирующих преобразователей.

Среди наиболее распространенных вариантов естественных выходных сигналов являются электрическое сопротивление и ЭДС (включая импульсы напряжения). Если говорить более широко, унифицированные сигналы применяются для связи не только датчиков, но и других устройств промышленной автоматики: регистраторов, регуляторов, контроллеров, исполнительных механизмов и прочих [20, 21, 28].

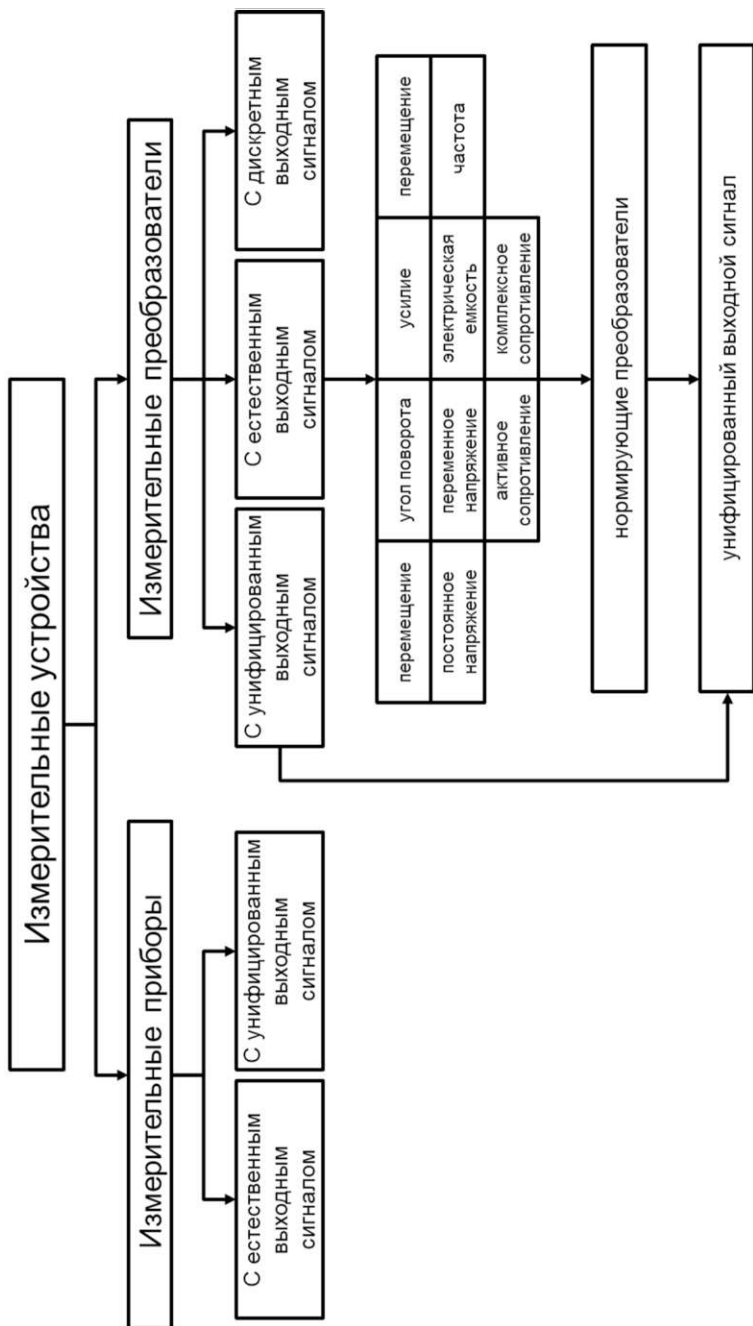
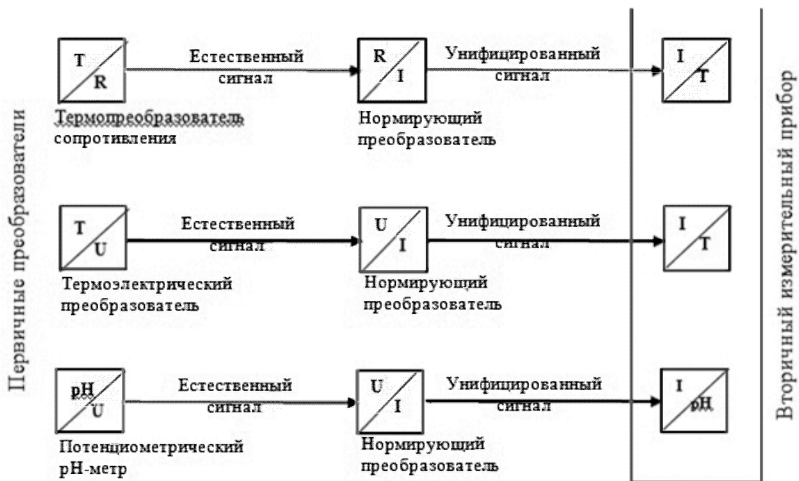


Рис. 12.1. Типы выходных сигналов средств измерений



**Рис. 12.2. Схема подключения различных первичных преобразователей к многоканальному вторичному измерительному прибору с применением нормирующих преобразователей**

Применение унифицированных сигналов регламентировано ГОСТ 26.011-80 «Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные». Стандарт устанавливает допустимые диапазоны унифицированных сигналов, а также вводит ограничения на величину сопротивления источников и приемников этих сигналов. В таблице 12.1 представлены основные виды унифицированных выходных сигналов, используемых в промышленности.

Таблица 12.1

**Основные виды унифицированных выходных сигналов**

Вид сигнала	Физическая величина	Параметры сигнала
Электрический	Постоянный ток	0-5, 0-20, -5-0-5, 4-20 мА
	Постоянное напряжение	0-10, 0-20, -10-0-10 мВ; 0-10, 0-1, -1-0-1 В
	Переменное напряжение	0-2, -1-0-1 В
	Частота	2-8, 2-4 кГц
Пневматический	Давление	0,2-1 кгс/см*см
Гидравлический	Давление	0,1-6,4 МПа

Среди стандартных сигналов тока и напряжения наиболее удобным и популярным является токовый сигнал 4–20 мА. Причины этого в том, что он наилучшим образом решает задачи, связанные с передачей сигналов от первичных преобразователей к вторичным измерительным приборам.

Сигналы первичных преобразователей, как правило, очень малы. Например, сигналы термоэлектрических преобразователей (термопар) обычно меньше 50 мВ. В промышленных условиях сильные электромагнитные помехи могут создавать паразитные сигналы, в сотни и тысячи раз превышающие полезные. Сильные токовые сигналы уровня 4–20 мА работают на низкоомную нагрузку и в результате они меньше подвержены такому влиянию.

Рассмотрим электрическую схему подключения измерительных приборов с применением унифицированного сигнала 4 – 20 мА (токовая петля). Нормирующий преобразователь, который формирует токовый сигнал 4–20 мА, является в этом случае источником стабильного тока с очень большим выходным сопротивлением  $r$ , которое существенно больше как сопротивления шунта в измерительном приборе  $R_{ш}$  (миллиамперметре), так и сопротивления соединительных проводов  $R_{пр}$ .

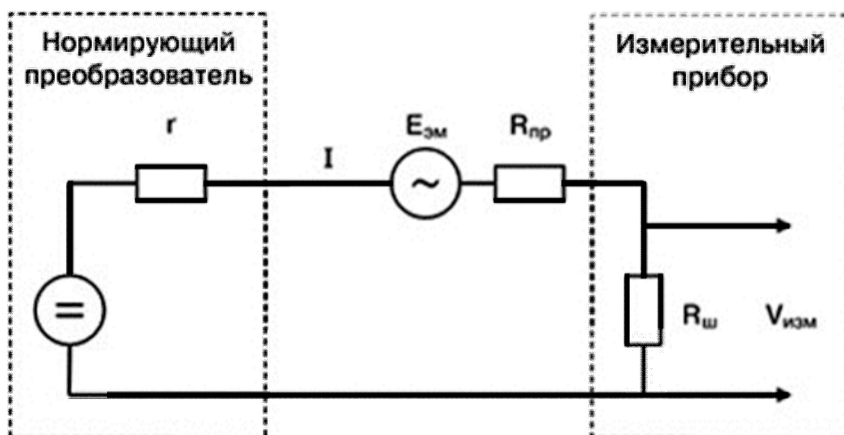


Рис. 12.3. Принципиальная электрическая схема подключения измерительных приборов с применением унифицированного сигнала 4–20 мА

Величина тока  $I$  не зависит от сопротивления нагрузки, поскольку применяется последовательное соединение. При этом в соответствии с законом Ома:

$$U_{\text{изм}} = I \cdot R_{\text{ш}}. \quad (12.1)$$

Очевидно, что сопротивление проводов (также применим термин линий связи) в этом случае практически не влияет на результат измерения. Для оценки можно принять, что дополнительная относительная погрешность, связанная с влиянием сопротивления нагрузки равна:

$$\delta = \frac{R_{\text{пр}} + R_{\text{ш}}}{r + R_{\text{пр}} + R_{\text{ш}}} \cong \frac{R_{\text{пр}} + R_{\text{ш}}}{r}. \quad (12.2)$$

Для характерных значений сопротивлений, приведенных выше, получим, что  $\delta < 0,06\%$ .

С другой стороны, в такой высокоомной цепи источник электромагнитных помех  $E_{\text{эм}}$  не в состоянии создать сколь угодно заметное по сравнению с полезным сигналом  $U_{\text{изм}}$  напряжение на низкоомном шунте  $R_{\text{ш}}$ . Напряжение помехи, измеренное прибором, будет равно:

$$\delta U_{\text{п}} = E_{\text{эм}} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{r}. \quad (11.3)$$

При  $E_{\text{эм}} = 1\text{В}$ , напряжение помехи будет составлять  $U_{\text{п}} = 50 \text{ мкВ}$ . Полезный сигнал при  $I = 20 \text{ мА}$  имеет величину  $1\text{В}$ . Таким образом, отношение помехи к полезному сигналу имеет порядок  $10^{-4}$ , а отношение входного сопротивления измерительного прибора (миллиамперметра) к сопротивлению шунта  $r/R_{\text{ш}}$  показывает степень подавления электромагнитных помех.

При работе с сигналами напряжения сигнал помехи  $U_{\text{п}}$  будет практически равен  $E_{\text{эм}}$ . Это демонстрирует преимущество токовых сигналов при работе в условиях сильных электромагнитных помех по сравнению с сигналами напряжения.

Необходимо также отметить, что при работе с токовым сигналом 4–20 мА легко обнаружить обрыв линии связи – ток будет равен нулю, т.е. выходить за возможные пределы. Обрыв в цепи с сигналом 0–5 мА обнаружить нельзя, так как ток, равный нулю,

считается допустимым. Для обнаружения обрыва в цепях с унифицированными сигналами напряжения (0–1В или 0–10В) придется применять специальные схемотехнические решения, что усложняет систему в целом.

## **12.2. Методы передачи информации в цифровых измерительных системах**

Долгое время унифицированные выходные сигналы являлись основным средством передачи информации в измерительных системах, но ситуация стала изменяться с развитием вычислительных систем, а также широким распространением цифровых средств измерения. Стало очевидно, что возможности по обработке, хранению и передаче результатов измерений в цифровом виде гораздо шире, чем в аналоговом варианте. С другой стороны основной задачей метрологий является не просто измерение, а измерение с заданной точностью, а любое преобразование результата измерений оказывает влияние на точность.

В целом начало XXI в. можно назвать временем четвертой промышленной революции, которая предполагает внедрение глобальных вычислительных сетей, элементов искусственного интеллекта, интернета вещей. Все это нужно для оптимизации технологических процессов, управления циклом жизни оборудования за счет предиктивных алгоритмов диагностики, а также внедрения методов адаптации оборудования к текущим условиям работы. Очевидно, что для решения вышеперечисленных задач нужна адекватная информация, а также методы ее извлечения, передачи и обработки. Об извлечении и обработке информации будет рассказано в соответствующих разделах настоящего учебного пособия, а сейчас подробно рассмотрим существующие способы передачи информации.

В настоящее время существует множество методов передачи информации в автоматизированных системах управления, в которые, как составные части, входят контрольно-измерительные системы (иногда используется сокращение КИС). В зависимости от области применения можно выделить протоколы, которые предпочтительно применять на полевого уровне (уровень первичных преобразователей), промежуточном уровне и верхнем уровне систем.

Так для полевого уровня важны такие характеристики как помехозащищенность, простота монтажа и эксплуатации, надежность, а также невысокая стоимость в силу большого количества приборов. Для верхнего уровня автоматизированной системы важны высокое быстродействие для обработки больших массивов информации, возможность передачи данных на значительные расстояния и развитые интеграционные способности со смежными системами. Средний же уровень должен обеспечивать эффективное взаимодействие между верхним и нижним уровнями.

Отдельной дискуссии заслуживает вопрос о том, что предпочтительнее: открытый протокол или закрытый. В первом случае программный код и описание протокола доступно всем и любой производитель может разрабатывать устройства, способные взаимодействовать в КИС, построенной на базе того или иного протокола. Такой подход существенно упрощает задачу разработчика при создании единой системы. В тоже время многие производители оборудования, особенно те из них, которые занимают большие доли рынка, пытаются, что называется, «привязать» потребителя только к своей продукции и предлагают уникальные решения, доступ к которым возможен только за дополнительную плату.

В настоящее время общая тенденция состоит в том, что открытость позволяет привлечь больше потребителей. Нельзя не учитывать тот факт, что поскольку сигналы практически всегда используют стандартный физический уровень, то их дешифровка не составляет больших трудностей, хотя и не гарантирует сохранение точности, что важно для метрологии.

Существует так называемая эталонная модель взаимосвязей в открытых системах – OSI (Open System Interconnection). Согласно этой модели, описание и применение коммуникационных протоколов подчиняется структурному разбиению на «слои» (уровни рассмотрения). Каждый уровень несет свою функциональную нагрузку. Соответствие разных протоколов модели OSI еще не означает их совместимости, но сильно облегчается реализация перехода от одного такого протокола к другому.

В полной модели OSI различают следующие уровни:

- физический уровень;
- уровень обмена данными;

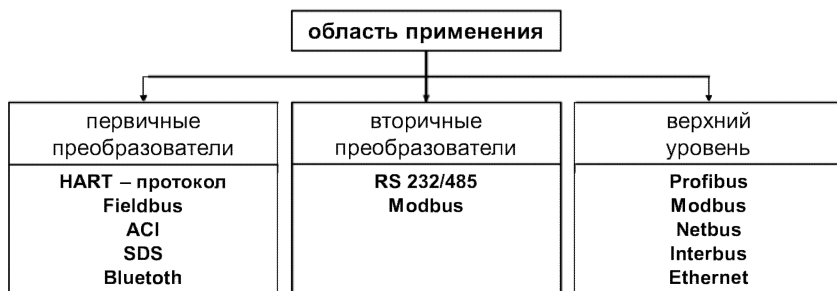
- уровень взаимодействия сетей;
- транспортный уровень;
- уровень описания сеанса работы;
- уровень представления информации;
- уровень прикладных задач.

В протоколе HART задействованы уровни 1, 2 и 7. Остальные не являются значимыми и не рассматриваются.

На рисунке 12.4 приведены примеры протоколов для различных уровней, которые получили наибольшую распространенность. Остановимся на некоторых из них подробнее.

В последние годы в различных отраслях промышленности широкое распространение получил HART-протокол, разработанный американской фирмой Rosemount, входящий в корпорацию Emerson Process. Поскольку в эту же корпорацию входит ведущий Российский производитель измерительной техники фирма «Метран», то технология нашла большое применение на территории нашей страны.

Само название HART является аббревиатурой от англоязычного названия Highway Addressable Remote Transducer, что может быть переведено на русский язык как высокоскоростной адресный удаленный передатчик, что во многом описывает суть этого протокола.



**Рис. 12.4. Примеры протоколов передачи данных в зависимости от области применения**

Само название HART является аббревиатурой от англоязычного названия Highway Addressable Remote Transducer, что может быть переведено на русский язык как высокоскоростной адресный удаленный передатчик, что во многом описывает суть этого протокола.



Основные сведения о HART-протоколе приведены в табл. 12.2. Как мы видим это открытый протокол, поддержкой которого занимается общественная организация Фонд HART коммуникаций, которой фирма Rosemount передала все права на интеллектуальную собственность, связанные с ним. Такой подход обеспечил широкое распространение протокола в промышленности.

Таблица 12.2

Основные сведения о HART-протоколе

Тип	Открытый
Разработчик	Rosemount (Emerson process)
Поддержка технологии	FieldComm Group
Принцип действия	частотная модуляция
Скорость	1,2 кбит/с (1200 бод)
Время обновления данных	2-3 раза в секунду
Максимальное расстояние передачи данных	3000 м
Количество приборов в сети	15
Структура	Master/Slave

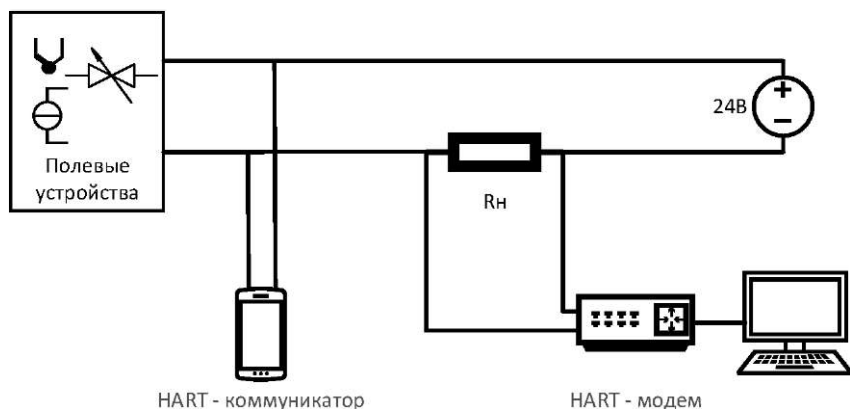


Рис. 12.5. Организация контрольно-измерительной системы (КИС) с применением HART-протокола

Первая открытая спецификация HART-протокола (версия 2.0) была представлена в 1986 г. В дальнейшие годы постоянно расширялись функциональные возможности протокола, что привело к ситуации несовместимости устройств, построенных на основе различных версий и в 1989 г. была представлена ревизия протокола 5.0, в которой был закреплен принцип совместимости снизу вверх и новые изменения вносятся таким образом, чтобы не затронуть уже имеющийся функционал.

В 2007 г. была представлена спецификация в версии 7.0, где впервые был описан беспроводной вариант применения – Wireless HART.

Сеть WirelessHART является самоорганизующейся. Для добавления устройства в сеть достаточно ввести пароль доступа к сети. При необходимости, устройства могут сами строить топологию ретрансляции. Расстояния между узлами сети могут достигать нескольких километров.

По состоянию на 2018 г. WirelessHART является единственной беспроводной сетью полевого уровня, признанной стандартом.

В стандарт, описывающий HART-протокол, входит 17 документов, охватывающих как проводной так и беспроводной (WirelessHART) вариант интерфейса. На 2018 год базовая спецификация имеет ревизию HART 7.5 (документ HCF-SPEC-13). Политика распространения официальных спецификаций предусматривает либо членство в стандартизирующей организации, либо покупку бумажных копий стандарта, в открытом доступе их нет.

Часть спецификаций проводного HART входит в стандарт IEC 61158-CPH9. WirelessHART стандартизирован как IEC 62591:2010 (стандарт МЭК). [17, 33, 35]

Стандарт определяет три уровня модели OSI — физический уровень, канальный и прикладной уровень. Физический уровень два — старый с частотной модуляцией и новый с фазовой. Канальный уровень определяет структуру фреймов. Прикладной — наборы команд.

Физический уровень HART выполнен поверх токовой петли стандарта 4–20 мА. Данные передаются модуляцией тока ам-

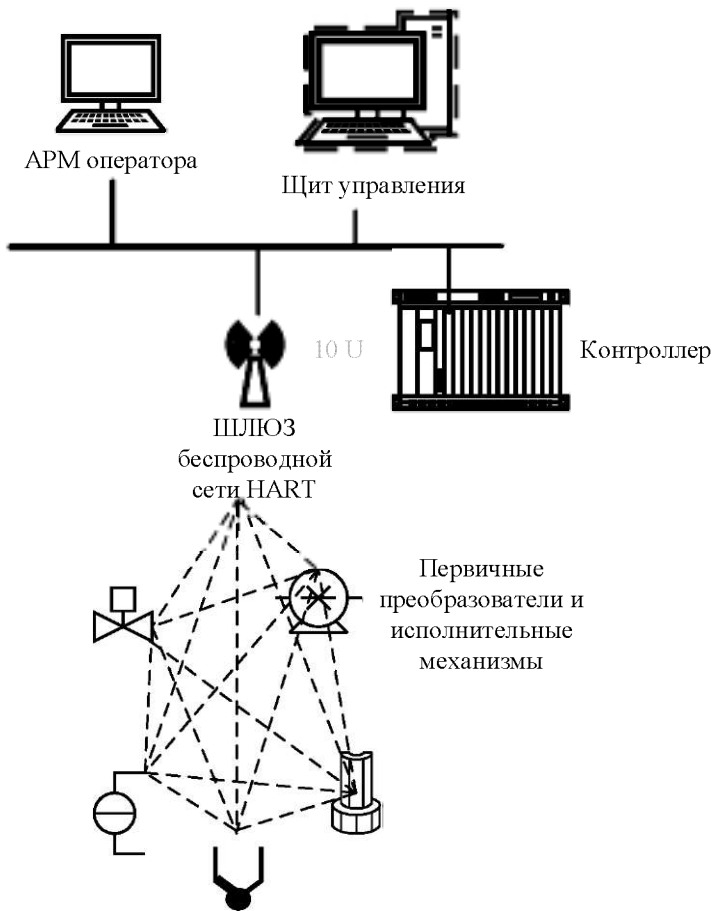
плитудой  $\pm 0,5$  мА со спектром выше 500 Гц, постоянная составляющая недопустима. При этом спектр аналогового сигнала токовой петли должен быть ограничен до 25 Гц. Минимальное сопротивление источника питания линии (присмника сигнала 4–20 мА) 230 Ом. Таким образом, питание полевого устройства, снятие его первичных показаний и вторичной информации осуществляется по двум проводам.

В основе HART-протокола лежит телекоммуникационный стандарт Bell 202, распространенный в США и построенный с применением принципа частотной модуляции: на несущий сигнал постоянного тока накладывается сигнал переменного тока в виде правильной синусоиды. Для передачи логической «1» используется один полный период частоты 1200 Гц, а для передачи логического «0» – два полных периода частотой 2200 Гц.

Как видно на рисунке, HART составляющая накладывается на токовую петлю 4–20 мА. Поскольку среднее значение синусоиды за период равно «0», то HART сигнал никак не влияет на аналоговый сигнал 4.20 мА. Этот факт обуславливает уникальную возможность рассматриваемого протокола одновременной передачи информации как в аналоговом, так и цифровом виде без влияния на точностные характеристики за счет устранения процессов аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования сигнала.

Впоследствии стандарт был дополнен более скоростным вариантом с фазовой модуляцией. Несущая 3200 Гц, 8-позиционная манипуляция, скорость 9600 бод. Стандарт определяет вариант с фазовой модуляцией как дополнительный и рекомендует возвращаться к частотной модуляции при проблемах со связью. При этом частотно-модулированный режим является обязательным для всех HART устройств.

Для маломощных полевых устройств существует альтернативная физическая основа (физический слой) HART-протокола, а именно: для передачи в обоих направлениях частотно-модулированный HART-сигнал накладывается на аналоговый сигнал напряжением 1–5В. Применим такой HART-протокол только для соединения устройств по схеме «точка – точка» (не для многоточечных соединений). Кроме того, ограничена длина линий связи: она составляет 150 – 330 м.



**Рис. 12.6. Принцип организации беспроводной сети WirelessHART**

Некоторые фирмы (включая, например, MicroMotion) предлагают приборы, использующие структуру и формат сообщений HART протокола на физическом слое RS-485 независимо от аналогового сигнала. Это чисто цифровой сигнал, без частотной модуляции. При наличии сбалансированной, имеющей подходящий импеданс линии связи скорости передачи могут достигать 38 400 бит/с, что позволяет с большей частотой производить отсчеты при измерениях. При скоростях, отличных от 1200 бит/с, временные соотношения для транзакций HART-протокола будут отличными от стандартных. Поддерживаются многоточечные соединения.

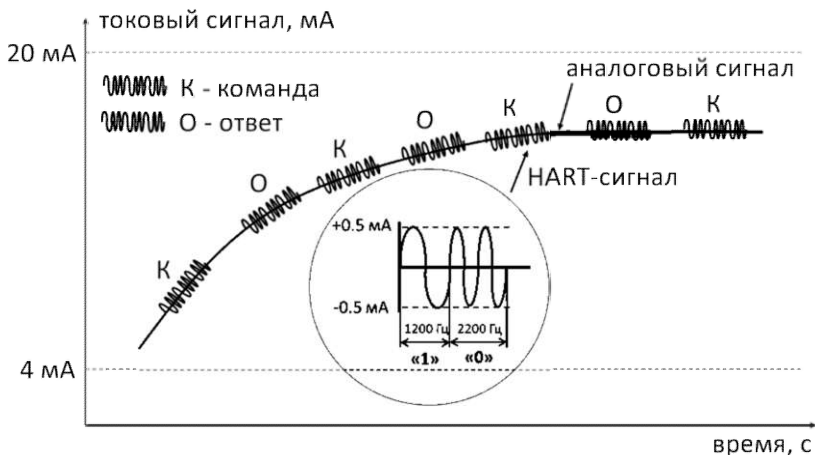


Рис. 12.7. Принцип работы HART-протокола

Нужно отметить, что альтернативные варианты физического слоя не включены в официальные спецификации протокола.

HART протокол построен по принципу «главный – подчиненный», т.е. полевое устройство отвечает по запросу системы. Протокол допускает наличие двух управляющих устройств (управляющая система и коммутатор).

Обмен ведется сообщениями — неразрывными наборами данных. Каждое сообщение содержит преамбулу для синхронизации демодулятора приемника и набор данных, называемых фреймом. Между сообщениями идут паузы, во время которых никакой модуляции на линию не идет. Данные передаются байтами в формате асинхронного интерфейса 801, то есть снабжены стартовым, стоповым битом и битом контроля нечетности (odd) для проверки целостности приема.

В режиме частотной модуляции преамбула представляет собой от 5 до 20 байт 0xFF того же формата 801. Ведомые устройства обычно используют минимальную для них длину преамбулы, мастер сети обязан начинать обмен с максимально длинной преамбулы и может уменьшать ее если позволяют ведомые устройства. В режиме фазовой модуляции преамбула отличается, но структура фрейма та же.

Пакет данных (фрейм) в протоколе стандартизирован, и его структура показана на рис. 12.8.

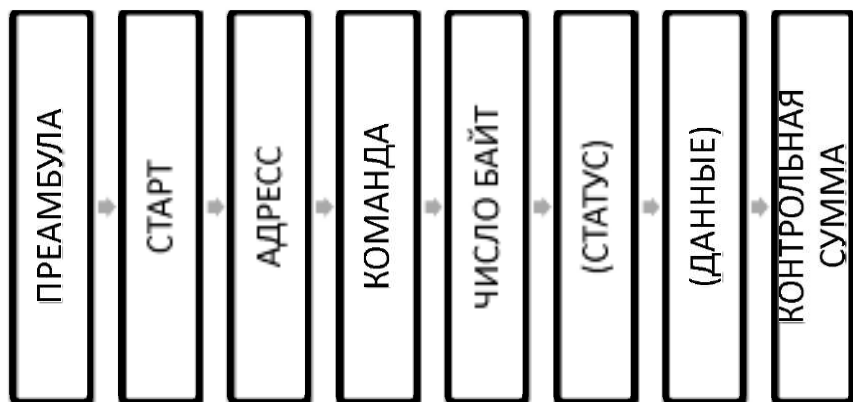


Рис. 12.8. Структура пакета данных в HART-протоколе

Ранние версии HART (до HART Revision 4 включительно) использовали короткий формат сообщения. В этом формате адрес полевого устройства есть либо 0 (для одноточечных систем, использующих токовый сигнал 4–20 мА для измерений), либо 1–15 (для многоточечных систем). Такая короткая форма адресации известна как опросная адресация (polling).

В пятой версии HART-протокола введен так называемый длинный формат сообщений. В нем адрес полевого устройства представляет собой уникальный идентификатор – 38-битный номер, собранный из кода фирмы-производителя, кода типа устройства и заводского номера устройства. Этот формат более надежен, так как полевое устройство лучше защищено от возможности приема сообщений, предназначенных другим устройствам вследствие, например, внешних или перекрестных помех. Этот формат расширяет также возможности адресации в больших системах (например, он позволяет организовать общий канал радиосвязи с большим количеством удаленных полевых устройств) [33, 40].

Строго говоря, упомянутый уникальный идентификатор не является абсолютно уникальным, так как из 8-битного кода фирмы производителя используется только 6 младших бит. Хотя, даже в мировом масштабе, вероятность повторения этого идентификатора очень мала – может встретиться только 4 устройства с одинаковым номером.

Большинство современных хост-устройств поддерживает как короткий, так и длинный формат сообщений. Поэтому они могут работать как со старыми, так и с новыми полевыми устройствами.

Прямбула содержит от 5 до 20 шестнадцатеричных символов  $F$  (все единицы). Это позволяет приемнику синхронизироваться с частотой сигнала и поступающим потоком символов после обнаружения HART-сигнала, а также обеспечивает небольшую задержку, требующуюся для смены режима «присл / передача» модема после окончания команды.

Первая попытка связи должна содержать 20 символов в преамбуле; это обеспечивает наилучшую синхронизацию. В отклике на команду #0 содержится более точная информация о том, сколько символов в преамбуле достаточно для работы с данным полевым устройством.

Стартовый символ в HART-сообщении имеет одно из нескольких возможных значений. В нем содержится информация о том, какой формат сообщения используется (короткий или длинный), источник сообщения и то, является ли сообщение пакетным.

Принимающие устройства воспринимают в качестве стартового тот символ, который идет сразу после преамбулы (а это по меньшей мере два  $FF$  символа). Стартовый символ полностью может быть идентифицирован содержимым битов 0, 1, 2 и 7. Предложено в последующих версиях HART-протокола использовать биты 5 и 6 для описания наличия или отсутствия дополнительных байтов между полями адреса и команды.

Поле адреса содержит как адрес хоста, так и адрес полевого устройства. Они содержатся в единственном байте при коротком формате сообщений или в пяти байтах при длинном формате.

Командный байт содержит целочисленную переменную (0 – FD в шестнадцатеричном представлении или 0 – 253 в десятичном), сопоставляемую с одной из команд. Это закодированное значение повторяется затем в отклике полевого устройства.

Все команды, применяемые для устройств поддержки HART-протокола, разделяются на три типа:

- универсальные – поддерживают функции, выполняемые всеми полевыми устройствами (перечень в табл. 2.8);

- **общеупотребительные** – поддерживают выполнение функций многих устройств, хотя и не всех и если устройство поддерживает определенную функцию, то такая команда приведет к ее выполнению (перечень в табл. 2.9);

- **специфические** – поддерживают особые функции для отдельных типов полевых устройств (перечень в табл. 2.10).

Следующее поле в структуре – счетчик байтов. Это поле занимает 1 байт, куда записывается целое число, показывающее количество оставшихся байтов, формирующих сообщение (т.е. секцию статуса и данных; байт контрольной суммы сюда не входит). Приемное устройство использует это число для идентификации байта контрольной суммы и для определения момента конца сообщения. Так как поле данных ограничено по максимуму 25 байтами, то значение, содержащееся в счетчике байтов, может быть от 0 до 27.

Статус (или «код ответа») включается только в ответное сообщение от полевого устройства. Он записывается в 2 байта и содержит информацию об ошибках коммуникации, статусе принятой команды (например, о том, что устройство занято, команда не распознана и т.п.) и текущем состоянии полевого устройства.

Таблица 12.3

### Примеры универсальных команд в HART-протоколе

Номер команды	Функции
0	Чтение информации об изготовителе и типе устройства
1	Чтение главной переменной и единицы измерения
2	Чтение значения токового выхода (в мА и % от полной шкалы)
3	Чтение до 4-х предопределенных динамических переменных
6	Запись опросного адреса
12, 17	Чтение или запись 32-символьного сообщения
13, 18	Чтение или запись 8-символьного тэга, 16-символьного дескриптора, даты - информации для идентификации объекта
14	Чтение информации о датчике главной переменной
15	Чтение массива, уточняющего выходную информацию: код функции преобразования, пределы измерения главной переменной, постоянная времени затухания переходного процесса и т.п.
16, 19	Чтение или запись номера финальной сборки устройства



Таблица 12.4

**Примеры общепотребительных команд в HART-протоколе**

Номер команды	Функции
33	Чтение до 4-х передаваемых переменных
34	Запись постоянной времени затухания переходного процесса
35	Запись значений границ диапазона измерения
36, 37	Установка верхней или нижней границы диапазона
40	Установка фиксированного выходного тока
41	Выполнение самодиагностики
47	Запись кода функции преобразования (квадратичная, линейная, логарифмическая и т.д.)
48	Чтение дополнительных данных о состоянии устройства
49	Запись серийного номера датчика главной переменной

Таблица 12.5

**Примеры специфических команд в HART-протоколе**

Номер команды	Функции
128, 129	Чтение или запись кодов материалов конструкции
130, 131	Чтение или запись типа сенсора
138, 139	Чтение или запись нижнего предельного значения расхода
146	Запуск, останов или очистка счетчика
146, 147	Чтение или запись аварийной уставки
153, 154	Чтение или запись калибровочного коэффициента плотности
166	Запись типа источника $\gamma$ -излучения

Рассмотрим поле данных. Не все команды или отклики на них содержат данные. Те, которые их содержат, должны соответствовать общим правилам по временному ограничению транзакций, а это значит, что размер поля данных не должен превышать 25 байт (нарушение этого ограничения допустимо лишь для HART RS-485, поскольку там используются более высокие скорости коммуникаций). Данные могут быть в форме целых чисел, чисел с плавающей точкой или символов ASCII. Количество байтов данных и формат их представления описываются для каждой команды индивидуально.

Байт контрольной суммы содержит результат побитной операции «Исключающее ИЛИ» (XOR) над всеми байтами сообщения, начиная со стартового символа. Тем самым, наряду с проверкой четности в каждом байте, обеспечивается контроль целостности передачи. Такая комбинация контрольных операций гарантирует обнаружение до 3 «испорченных» битов в сообщении.

Само по себе использование коммуникационного протокола еще недостаточно для обеспечения эффективной работы системы, поскольку разные устройства обычно имеют индивидуальные особенности по работе с данными. Ранее, в эпоху первых версий HART, это означало, что хост-устройства должны были подвергаться доработке по изменению их программного обеспечения при каждой смене моделей применяемых полевых устройств. Это приводило к существенным затратам средств и времени, ограничивало области применения конкретных хост-устройств (обычно поставщики хост-устройств являлись и поставщиками сопряженных с ними полевых устройств). С ростом популярности HART-протокола и увеличением числа производителей HART-устройств стало очевидно, что дальше невозможно наращивать выпуск хост-устройств с таким негибким программным обеспечением, которое не позволяет потребителю пользоваться всей широкой номенклатурой выпускаемых полевых устройств.

Язык описания устройств DDL (Device Description Language) решает многие проблемы, касающиеся ввода и эксплуатации новых интеллектуальных устройств. Специальные описания устройств, реализуемые в нем, позволяют осуществить быструю модернизацию хостов для поддержки новых полевых устройств без переписывания программного обеспечения. Этот язык может быть использован в любом хост-устройстве для обеспечения полного и точного интерфейса с каждым полевым устройством. DDL обеспечивает полную совместимость устройств от разных производителей. Проводя аналогии, можно сказать, что DDL для HART-систем – это то же, что HTML для Интернета

Фонд FieldComm Group поддерживает специальный архив описаний полевых устройств, в котором производители приборов могут регистрировать DDL-описания своих новых устройств, а

также распространение DDL-описаний среди разработчиков хост-устройств, которые являются членами группы [17, 35].

Существует два основных режима работы HART-протокола: точка – точка и многоточечный.

В режим точка – точка в информационную сеть включено только одно полевое устройство, а передача информации возможна как в цифровом, так и аналоговом виде. Этот способ подключения используется в аналоговых АСУ ТП и служит для решения задач по удаленной конфигурации и настройке полевых устройств с целью повышения производительности труда метролога.

В цифровых АСУ ТП используется многоточечный режим, предусматривающий подключение в каждом сегменте сети до 15 элементов. Ограничение в 15 элементов может быть преодолено с помощью применения мультиплексоров. Количество же в итоге определяется длиной и качеством линий связи, а также мощностью блока питания.

Передача информации в многоточечном режиме возможна только в цифровом виде. Аналоговый выход автоматически фиксируется на минимальном значении (питание устройства – 4 мА) и не содержит информации об измеряемой величине. Основная задача применения HART-протокола в многоточечном режиме это передача результатов измерений, конфигурация, настройка и автоматическая диагностика средств измерений в цифровых АСУ ТП.

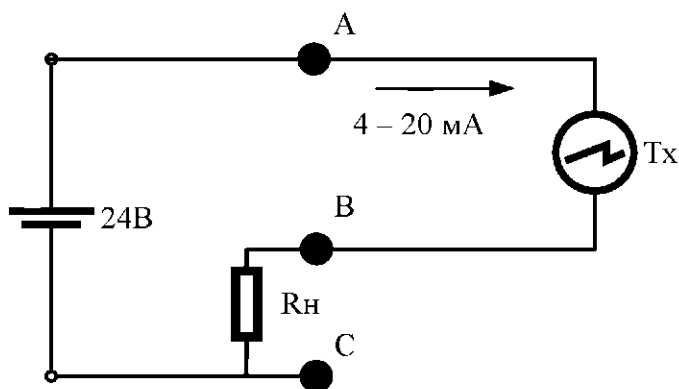


Рис. 12.9. Двухпроводная токовая коммуникационная петля в режиме точка – точка

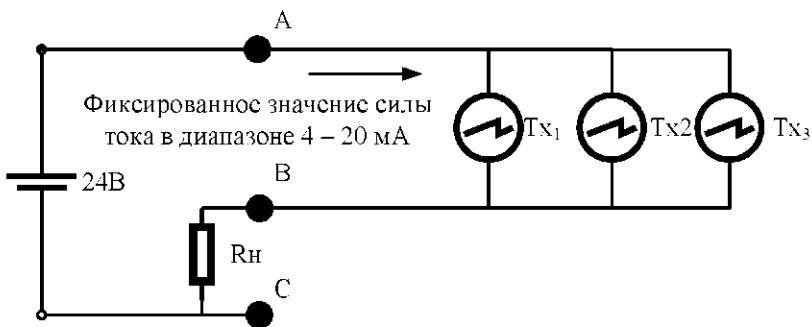
При организации HART-сети необходимо достаточно реализовать обычную коммуникационную цепь с передатчиком, включенным последовательно в токовую петлю посредством двухпроводной линии (показана на рис. 2.10). Практически требуется 3 основных элемента: источник питания, передатчик Tx и нагрузочный резистор R<sub>n</sub>. Они могут быть соединены в любом порядке, и заземлена может быть любая точка цепи. Сопротивление нагрузочного резистора должно быть в диапазоне 230–1100 Ом. Многие HART-устройства имеют встроенный блок питания и поэтому внешний источник питания не требуется.

HART-сигнал должен индуцироваться и детектироваться в полевой петле. Источник питания для частот HART-сигнала можно считать короткозамкнутым участком, поэтому контролирующее устройство не может быть подсоединено непосредственно параллельно ему. Оно должно быть соединено либо к точкам А и В, либо параллельно резистору R<sub>n</sub> (к В и С). В последнем случае цепь замыкается через источник питания.

Включение HART-коммуникатора в цепь не должно создавать падения постоянного напряжения в линии. Для обеспечения этого HART-коммуникатор должен включаться в цепь через конденсатор емкостью не менее 5 мкФ.

Для предотвращения потерь высокочастотного сигнала требуется тщательно выполнить заземление. Для уменьшения влияния этого фактора полезно выполнять гальваническую развязку коммуникатора или другого хост-устройства с петлей связи.

В каждом передаваемом HART-сообщении содержится адрес. Присвоив каждому полемому устройству свой адрес, можно параллельно подсоединить к единственной паре проводов несколько полевых устройств. Каждое из них будет принимать сообщение, адресованное только ему (или сообщения, адресованные всем одновременно). Поскольку наложение аналоговых токовых сигналов 4–20 мА при одновременном действии приведет к бессмысленному общему целому, то операция установки какого-либо опросного адреса сопровождается принудительным сбросом аналогового сигнала в нулевое состояние (4 мА). При этом минимизируется потребляемая мощность. Допускается включение в многоточечную систему до 15 устройств. На рис. 12.10 показан пример многоточечной системы с 3 устройствами.



**Рис. 12.10. Двухпроводная токовая коммуникационная петля в многоточечном режиме**

Для обеспечения работоспособности системы определены требования к комплексному сопротивлению (импедансу) устройств, образующих информационную сеть, а также к линиям связи.

Важно отметить, что для хост-устройств существуют также отдельные требования по индуктивной и емкостной составляющей импеданса, а для главного хост-устройства импеданс источника (при передаче) должен быть не более, чем импеданс шунта (при приеме).

Заметим, что импеданс главного хост-устройства описан в предположении, что он включает в себя нагрузочный резистор  $R_n$ . Если это не так, то импеданс хост-устройства должен быть несколько выше, чтобы удовлетворить требованиям протокола.

Максимальная емкость шунта носит скорее рекомендательный характер. Устройства, имеющие большие значения емкости, характеризуются коэффициентом  $CN$ , который представляет собой округленную до ближайшего большего целого кратность превышения значения 5000 пФ (например, устройство с емкостью шунта 22000 пФ имеет  $CN=5$ ).

Для связи с полевыми HART-устройствами на относительно коротких расстояниях (до 1500 м) можно использовать витые пары с общим экраном. При более длинных линиях связи необходимо экранировать каждую витую пару, чтобы избежать перекрестных помех. Впрочем, при общей экранировке для защиты от перекрестных помех тоже надо предпринимать некоторые меры,

а именно, – помещать в один экран пары, которые будут интерферировать в наименьшей степени. Для этого можно помещать в тот же экран и чисто аналоговые пары.

Таблица 12.6

**Требования к величинам импеданса различных элементов сети, организованной в соответствии с HART-протоколом**

Устройство	Параметр	Значение
Главное хост-устройство (включая резистор RL)	Импеданс шунта (прием)	230–1100 Ом
	Максимальный импеданс источника (передача)	700 Ом
Вторичное хост-устройство	Минимальный импеданс шунта (прием)	5 кОм
	Максимальный импеданс источника (передача)	100 Ом
Полевое устройство	Минимальное сопротивление шунта	100 кОм
	Максимальная емкость шунта	5000 нФ
Другие устройства (в совокупности)	Минимальный импеданс шунта	10 кОм
	Максимальный последовательный импеданс	100 Ом

Если кабель длиннее нескольких метров, его сопротивление и емкость могут существенно повлиять на постоянную времени RC-цепи, поэтому стоит ее проверить на соблюдение лимита в 65 мкс (максимальное значение допустимое для работы в сети, организованной по HART-протоколу, не допускающей искажения сигнала [33]).

Сопротивление проводов линии также может быть причиной большого падения напряжения источника питания, и это надо учитывать при расчете напряжения источника.

Электрические параметры кабеля зависят от диаметра проводника, типа и толщины изоляции. Причем речь идет об изоляции, которой непосредственно покрыты проводники, – внешняя

оболочка здесь не учитывается. При расчетах емкости проводников имеется в виду емкость именно отдельного проводника по отношению к другим проводникам и экрану (а не взаимная емкость пары проводов). При расчете сопротивления линии надо сложить сопротивления обоих проводов линии.

Таблица 12.7

**Влияние типа изоляции на удельную ёмкость проводников**

Изоляция	Ёмкость, пФ/м
ПВХ	300–400
Полиэтилен	150–200
Пенополиэтилен	75–100

Таблица 12.8

**Зависимость удельного сопротивления проводников от геометрических размеров**

Проводники		Сопротивление (для двух проводов линии), Ом/км
Площадь, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм	
2,0	1,6	17
1,3	1,3	28
0,8	1,0	45
0,5	0,8	70
0,3	0,6	110
0,2	0,5	160

При расчете влияния длины линии на HART-сигнал желательно оперировать реальными значениями параметров, измеренными для конкретного кабеля. Однако прикидочная оценка сопротивления и емкости может быть сделана исходя из свойств диэлектриков и проводников, некоторые из них приведены в табл. 12.7 и 12.8.

Обычно кабели с меньшей электрической емкостью имеют более тонкие проводники и, следовательно, более высокое сопротивление. Типичные комбинации для наиболее распространенных типов кабелей приведены в табл. 12.9.

**Характеристики типовых кабелей, применяемых  
для построения контрольно-измерительных систем**

Тип кабеля	Изоляция	Пример	Емкость, пФ/м	Сопротивле- ние, Ом/км
Приборная экра- нированная витая пара	ПВХ	B85308-2	400	24–80
	полиэтилен	B85308-1	200	24–80
	пенополиэти- лен	Kerpen 7093	100	36
Экранирован- ный многожил- ный кабель	ПВХ	Belden 8441	270	110
Экранированная витая пара для компьютеров	полиэтилен	Belden 9873	180	75
Спец. кабель с малой емкостью (для RS-485)	полиэтилен	Belden 9729	73	160

В простейшем случае, когда имеется единственное полевое устройство и единственное хост-устройство с 250-омным нагрузочным резистором, правило соблюдения лимита 65 мкс позволит иметь общую емкость не более 0,26 мкФ. Если допустить, что емкость устройства равна 0,01 мкФ (5000 пФ на само полевое устройство и столько же на управляющее устройство), то емкость кабеля не должна превышать 0,25 мкФ. Однако электрическое сопротивление кабеля понижает разрешенную емкость и, следовательно, длину кабеля.

Для обычного приборного кабеля сечением провода 1 мм<sup>2</sup> с полиэтиленовой изоляцией (200 пФ/м, 36 Ом/км) правило 65 мкс наложит ограничение на длину кабеля 1100 м. Используя более качественный кабель (100 пФ/м, 36 Ом/км) можно увеличить длину линии связи до 2000 м (с учетом предельной длины в соответствии с табл. 2.15). Многоточечная структура системы уменьшает возможную длину кабеля. Большое значение в этом случае играет коэффициент CN.



Чтобы избежать влияние внешних наводок необходимо правильно выполнять заземление. Сигнальная цепь должна быть заземлена в одной точке. Экран кабеля также должен быть заземлен только в одной точке, и он не должен быть соединен с корпусами приборов и клеммных коробок, если последние не изолированы от земли. Эта единственная точка заземления обычно выполняется вблизи главного управляющего устройства.

Таблица 12.10

### Максимальная длина для кабелей сечением 1 мм<sup>2</sup>

Полевые устройства	Изоляция		
	ПВХ	Полиэтилен	Пенополиэтилен
1 (CN=1)	600 м	1100 м	2000 м
многоточ. 10 (CN=1)	500 м	900 м	1600 м
многоточ. 10 (CN=4,4)	85 м	150 м	250 м

\*Длины линий связи приведены из расчета, что сопротивление нагрузочного резистора равно 250 Ом. Емкости кабелей взяты равными 400, 200 и 100 пФ/м соответственно для ПВХ, полиэтиленовой и пенополиэтиленовой изоляции.

Существуют также требования к источникам питания. Обычно напряжение питания приборных цепей составляет 24В постоянного тока. Этого напряжения должно быть достаточно для обеспечения нормальной работы полевого устройства с учетом падения напряжения на кабеле, нагрузочном резисторе и искрозащитном барьере, если последний используется. В случае аварийных ситуаций устройства могут потреблять ток до 22 мА. Это значение нужно использовать при расчетах падения напряжения на элементах цепи для наихудшего случая.

Таблица 12.11

### Требования к источнику напряжения

Параметр	Значение
Максимальный размах пульсаций (47–125 Гц)	0,2 В
Максимальный уровень шумов (500 Гц – 10 кГц), среднеквадратическое значение	1,2 мВ
Максимальный последовательный импеданс (500 Гц – 10 кГц)	10 Ом

Существуют дополнительные требования для источника питания HART-сигнальной цепи; они перечислены в табл. 12.11. Требования по уровню пульсаций и шумов разработаны из условия предотвращения прямого влияния этих факторов на HART-сигнал. Ограничения по импедансу источника введены для исключения случайных перекрестных связей цепей, питаемых от общего источника.

Помимо технических требований к организации информационной сети необходимо предусмотреть ее защиту от несанкционированного доступа. С одной стороны, может показаться, что для HART-протокола это неактуально: токовая петля не имеет непосредственного выхода в Интернет, а верхний уровень обеспечивается собственными средствами киберзащиты. Действительно, в настоящее время высокая сегментированность и иерархичность являются неотъемлемыми свойствами АСУ ТП. Эти свойства могут создать ложное ощущение безопасности инфраструктуры, поскольку на первый взгляд двумя основными точками проникновения в сеть предприятия для атакующего являются демилитаризованная зона и КИС. Таким образом, для того чтобы получить доступ в промышленный сегмент сетевой инфраструктуры, атакующий должен преодолеть множество межсетевых экранов, систем обнаружения и предупреждения вторжений и других систем защиты. К сожалению, многоуровневая инфраструктура все еще остается уязвимой по отношению к атакам с нижних уровней, причем эти уровни зачастую защищены гораздо хуже [17].

Это утверждение в полной мере справедливо и для HART-протокола, который уязвим для различных типов атак:

1) подключив к линии HART с помощью устройства с высоким импедансом возможно незаметно прослушивать линию, получая таким образом информацию об инфраструктуре;

2) при подключении к токовой петле возможно перенастроить какой-либо датчик или подделать его: например можно изменить адрес Polling ID датчика на новый, а потом ответить управляющему устройству со старым Polling ID, то PLC или компьютер будут считать, что работают с реальным датчиком, в то время как на самом деле это датчик поддельный.

Помимо вышеперечисленных рисков слабая защищенность HART-протокола может привести к компрометации защищенности всей системы. Современные программные средства, работа-

ющие с HART, например OPC-серверы (Open Platform Communications) и PAS-системы (Plant Asset Management), обладают возможностью глубокой интеграции с другими элементами инфраструктуры, в том числе с системами MES (Machine Execution System) и ERP (Enterprise Resource Planning).

Эта интеграция может проходить через PAS-системы, которые взаимодействуют с устройствами на базе HART при помощи спецификации FDT/DTM (Field Device Tool/ Device Type Manager). Технология FDT/DTM была создана FDT Group, чтобы упростить разработку систем PAS и работу с полевыми устройствами. В основе технологии лежит объектная модель компонентов (COM), в которой элементы взаимодействуют между собой посредством XML-сообщений. Иными словами, данные, полученные от полевых датчиков, упаковываются в XML-сообщения и передаются в PAS-систему, откуда они могут быть переданы на более высокие уровни — в MES или ERP.

Если в компоненте, работающем с датчиком, недостаточно корректно реализована (или вообще отсутствует) фильтрация входных данных, то злоумышленник может, изменив конфигурацию или подделав датчик, вызвать внедрение нежелательного XML-кода внутрь PAS-системы. Это чревато серьезными последствиями, поскольку в таком случае злоумышленник проникает на верхние уровни иерархии АСУ ТП, даже если они отделены от нижних при помощи межсетевых экранов.

Последствиями такой атаки могут стать:

- отказ в доступе, чтению произвольных файлов;
- воздействие на механизмы аутентификации;
- выполнение произвольного кода в системе.

Все это в худшем случае может спровоцировать полную компрометацию инфраструктуры как на нижних, так и на верхних уровнях, а за счет глубокой взаимосвязи компонентов в АСУ ТП злоумышленник может перехватить контроль над всем производственным процессом, от нижних уровней до верхних.

Это становится возможным благодаря тому, что при сегментировании и изолировании различных АСУ ТП пока редко учитывается тот факт, что атака извне может произойти не только со стороны Интернета или КИС, но и с уровня промышленных протоколов или полевых устройств.

К сожалению, в случае использования HART-протокола, основным методом защиты остается лишь гарантирование физической безопасности линий токовой петли. Кроме того, необходимым является аудит инфраструктуры АСУ ТП, в том числе и программных средств, интегрированных с HART, для того чтобы злоумышленник, даже получив доступ к токовой петле, не смог проникнуть на другие уровни и сегменты инфраструктуры.

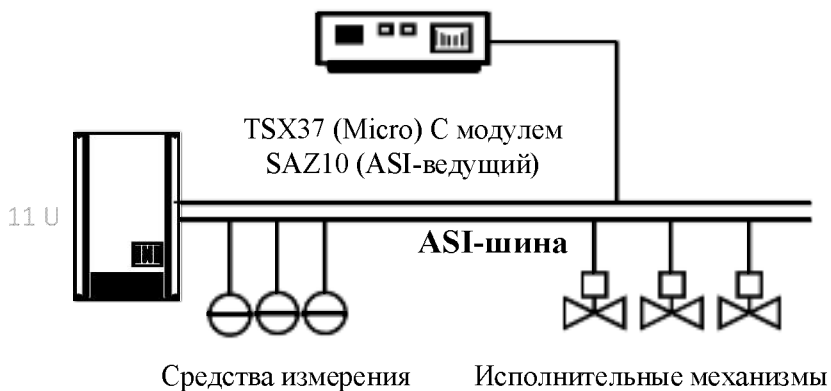
Помимо HART существуют и другие протоколы, преимущественно разработанные производителями средств измерения и автоматики, что определяет их ограниченное применение.

Одним из наиболее распространенных протоколов является ASI (Actuator Sensor Interface – интерфейс приводов и сенсоров). Первые продукты, работающие по технологии ASI, вышли на рынок 1993 г. Сегодня эта технология поддерживается более чем сотней производителей систем управления, включая Allen-Bradley, Siemens и SchneiderElectric. Основная задача этой сети – связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня автоматизируемого процесса (фотоэлектрические датчики, исполнительные устройства, реле, контакторы, емкостные переключатели, приводы, стартеры и т.п.) с системой контроллеров. Чаще всего системы, поддерживающие этот протокол, применяются в системах управления машиностроительных предприятий, конвейерных и упаковочных линий.

ASI-интерфейс позволяет через свои коммуникационные линии не только передавать данные, но и подводить питание (24 VDC) к датчикам и исполнительным устройствам. Здесь используется принцип последовательной передачи на базовой частоте. Информационный сигнал модулируется на питающую частоту.

К одному контроллеру можно подключить до 31 устройства. Протяженность сегмента ASI-шины может достигать 100 м. За счет респитеров длину сети и число узлов можно увеличивать. Топологией ASI-сети может быть шина, звезда, кольцо или дерево с циклом опроса 31 узла 5 мс.

Основной кабель представляет собой плоский (не экранированный и не витая пара) двужильный кабель, использующийся одновременно для основного питания (24 VDC) датчиков и исполнительных механизмов и для последовательной передачи двоичной информации сбора данных с устройств, подключенных к шине.



**Рис. 12.11. Схема взаимодействия контроллеров Micro (Schneider Electric) с полевыми устройствами по шине ASI**

Некоторые контроллеры поддерживают модули мастера шины ASI, которые управляют передачей данных между различными компонентами шины ASI и действует как точка подключения шины к управляющему (host) контроллеру. Контроллер в такой сети играет роль мастера, а периферийные устройства – подчиненных. Максимальный объем данных с одного ASI-узла – 4 бита (рис 12.11).

Компания Honeywell предложила протокол SDS (Smart Distributed System – умная распределенная система). По сути, это система ввода/вывода с распределенной логикой, для построения сетей, объединяющих периферийные устройства различных производителей (рис.12.12).

Эта сеть позволяет работать с такими устройствами ввода/вывода, как концевые выключатели, фотоэлектрические и бесконтактные датчики, позиционеры, и осуществлять обмен информацией на высоких скоростях.

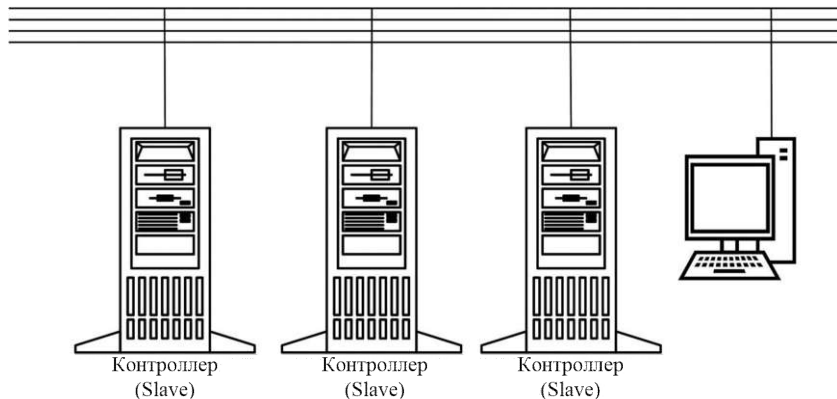
Преимущества сети протокола SDS (рис. 12.12):

- одна и та же сеть для контроллеров и источников информации;
- питание осуществляется по проводам сетевого кабеля;
- диагностика на уровне физических устройств;
- время прохождения данных по сети может достигать 0,1 мс.

**Основные характеристики сети, построенной по проколу SDS**

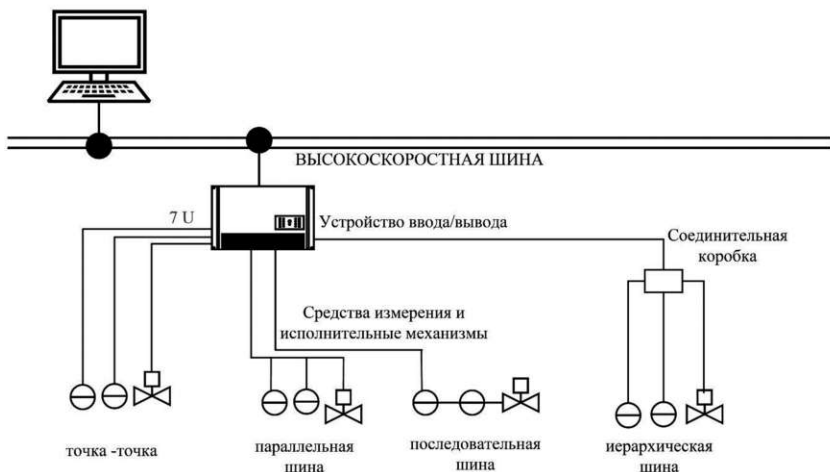
Длина шины	Скорость	Длина ответвления	Число устройств
30,5 м	1 Мбит/с	0,9 м	32
121,9 м	500 Кбит/с	1,8 м	64
243,8 м	250 Кбит/с	3,7 м	64
487,7 м	125 Кбит/с	7,3 м	64

Периферийные устройства подключаются к мастер-модулю SDS обычным 4 проводным кабелем (рис. 12.12). Таким образом, модуль SDS заменяет стандартные модули ввода/вывода, обеспечивая подключение 64 дискретных входов или выходов (распределенный ввод/вывод). В каркас процессора DL405 (Kooyo) можно устанавливать до 8 ведущих модулей SDS (до 512 адресатов на процессор).



**Рис. 12.12. Архитектура КИС, построенной по протоколу SDS**

В настоящее время ведется активная работа над новым протоколом цифровых высокоскоростных полевых коммуникаций, который известен под названием FieldBus (рис. 12.13). Так же, как и HART, он разработан для низшего уровня в иерархической структуре информационно-управляющих систем.



**Рис. 12.13. Архитектура КИС, построенной по протоколу Fieldbus**

Главным стимулом разработки Fieldbus было стремление повысить скорости и объемы передаваемых данных. Основными чертами протокола являются:

- передача питания по шине;
- многоточечность;
- встроенные функции помехозащиты.

Однако совместимости с аналоговыми системами здесь уже не осталось.

Протокол Fieldbus имеет 2 физических уровня:

- физический уровень H1FF (медленный), обеспечивающий рабочую скорость 31,25 Кбит/с;
- физический уровень H2FF (быстрый), обеспечивающий рабочую скорость до 1 Мбит/с.

Основные преимущества систем, построенных по протоколу Fieldbus:

- снижение капитальных и проектных расходов;
- уменьшение количества оборудования;
- уменьшение количества кабелей;
- ускорение пуско-наладки (автоматизированное конфигурирование датчиков с помощью ПО);
- упрощение чертежей и уменьшение времени на их разработку;

- ускорение разработки конфигурации;
- упрощение монтажа.
- повышение стабильности процесса.
- увеличение времени непрерывной работы процесса.
- снижение расходов на обслуживание и эксплуатацию.

В середине июля 2017 г. организация Bluetooth SIG, которая занимается развитием беспроводной технологии, анонсировала формат Bluetooth mesh с многоячеичной передачей данных [40].

Представленный стандарт Bluetooth для передачи данных использует виртуальную сеть из множества ячеек. Данные в сети передаются от одной ячейки к другой, пока не дойдут до адресата.

Пакет информации (сообщение) может содержать до 384 байт информации при использовании механизма сегментации и сборки (Segmentation and Reassembly – SAR), но большинство сообщений ограничиваются одним сегментом размером 11 байт. Каждое сообщение начинается с операционного кода (opcode), который для специальных сообщений состоит из 1 байта, для стандартных – из 2 байтов, а специфичных для конкретного производителя оборудования из трех [40].

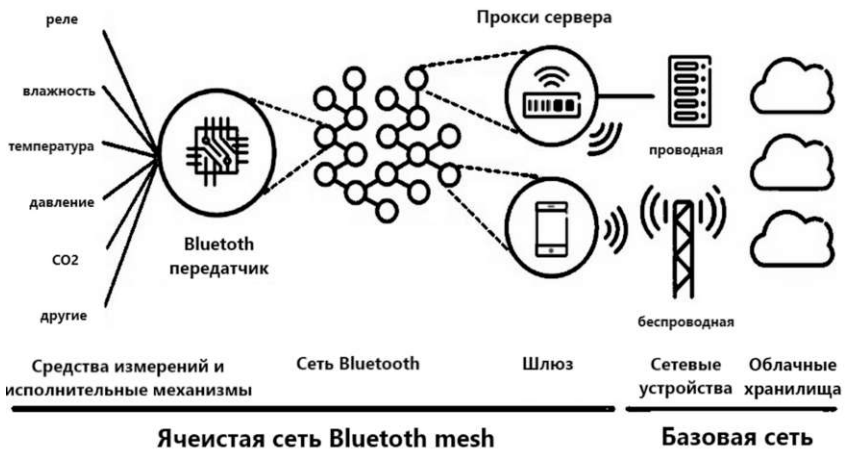


Рис. 12.14. Архитектура КИС, построенной по протоколу Bluetooth mesh



Структура в целом похожа на HART wireless, но позволяет обеспечить высокую совместимость с современными мобильными устройствами и предназначена прежде всего для систем, которые известны как Умный дом.

Стандарт Bluetooth Mesh может применяться, например, если нужно отправить данные с датчика в одной комнате на компьютер в другой или в той же квартире. Информация будет передаваться через промежуточные узлы: смартфоны, планшеты, компьютеры и любые другие устройства, которые поддерживают технологию.

Идея добавить новый вид развёртывания сети связана, собственно, с решением задачи по упрощению развёртывания легко изменяемых и подгоняемых сетей Умного дома. Независимость устройств от главного повышает надёжность системы и позволяет не перегружать имеющийся «мозг» системы мелкими периферийными соединениями, в которых вмешательство центрального компьютера не очень-то и нужно. Как результат, устройства интернета вещей смогут работать дольше от одного аккумулятора, при этом их не потребуется подключать по проводу. Особенность Bluetooth Mesh в том, что он не требует изменения аппаратной «начинки» устройства. Стандарт может работать на всех устройствах с Bluetooth 4.0 и 5.0, однако потребуется обновление программного обеспечения.

По сути, реализуется подход, когда периферийные модули способны обмениваться данными, не загружая ядро.

Акцент сделан и на защите, ведь чем больше автоматика в Умном доме, тем большие последствия могут возникнуть при взломе такой системы. Каждое сообщение зашифровано и имеет идентификатор. Используется два типа ключей:

- 1) ключ сети, определенный для конкретной mesh-сети;
- 2) ключ применения, специфичный для конкретной задачи.

У сообщений ограничен срок существования (time to live – TTL). При этом каждый раз сообщение после получения пересылается. Ограничение срока существования задает конечное число попыток передачи, чтобы избежать замкнутых циклов и, в конечном итоге перегрузки сети [36].

Активное применение в современной жизни мобильных устройств привело к тому, что на Bluetooth mesh обратили внимание разработчики систем автоматизации для промышленности

и прежде всего там, где существует множество распределенных объектов. В целом, ячеистая сеть позволит беспрепятственно общаться даже самым удалённым датчикам на производстве без необходимости применения маршрутизатора и проводного соединения с хабами. На производстве с помощью такой сети можно гораздо проще передать большое количество данных, например, от робота к панели управления.

Сегодняшние интеллектуальные средства измерений являются частью непрерывно эволюционирующей цепочки от пневматических приборов и аналоговой электроники с выходом 4–20 мА до смешанных аналогово-цифровых коммуникаций (HART) и далее до полностью цифровых коммуникаций (Fieldbus). Это часть общего движения к более широкому использованию цифрового обмена информацией в приборах и управляющих системах, характерных для четвертой промышленной революции.

### 12.3. Влияющие величины

Влияющие величины – это величины, не измеряемые данным средством измерения, но оказывающие влияние на результат измерений. К ним, как правило, относятся:

- температура;
- давление;
- вибрация;
- напряжение питания;
- влажность.

Средства измерения проектируются для применения при нормальных условиях, т.е. таких условий, когда влияющие величины находятся в пределах нормальной области значений и не оказывают существенного влияния на результаты измерений.

Стандартные значения нормальных условий, для применения в которых проектируется большинство средств измерений:

- температура ( $20 \pm 5$  °C);
- давление (101 кПа);
- напряжение питания ( $222 \pm 2$  В);
- относительная влажность (80%).

Очевидно, что зачастую условия эксплуатации средств измерения отличаются от нормальных, что вызывает дополнительную погрешность. В этом случае нормированию подлежат либо сами функции влияния, либо изменения значений метрологических характеристик средств измерений, вызванные изменениями влияющих величин в установленных пределах.

Как правило, характеристики чувствительности к влияющим величинам нормируются как пределы дополнительной погрешности.

Например, в нормативно-технической документации для преобразователей давления может быть указано: что предел основной допустимой погрешности составляет 1% в диапазоне компенсированных температур окружающей среды, а вне этих пределов возникает дополнительная погрешность 0,2% на каждые 10°С вне пределов диапазона компенсации.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности допускается выражать в форме, отличной от формы выражения пределов допускаемой основной погрешности.

Как правило, характеристики дополнительной погрешности не указывают непосредственно на приборе, что требует тщательного изучения технической документации при выборе средств измерения.

В двенадцатой и последней главе этого учебного пособия рассматривались передача, хранение и представление измерительной информации с помощью современных цифровых средств. Сначала изучались измерительные сигналы, затем – методы передачи информации в цифровых измерительных системах и некоторые применяемые в измерительных системах протоколы передачи данных, например, HART.

Конец главы был посвящен величинам, которые непосредственно не измеряются, но оказывают влияние на результаты измерений, например, температуре и влажности воздуха и погрешностям, которые эти величины вызывают.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что называется естественным сигналом?
2. Какие существуют распространенные виды естественных сигналов?
3. Какие существуют основные виды унифицированных сигналов?
4. Какие уровни различают в полной модели OSI?
5. Какие протоколы передачи данных применяются в настоящее время в промышленности?
6. Как расшифровывается аббревиатура HART?
7. Как организуется контрольно-измерительная система с применением HART-протокола?
8. Какой стандарт лежит в основе HART-протокола? На чем базируется этот стандарт?
9. Как организуется беспроводная сеть Wireless HART?
10. Каков принцип работы HART-протокола?
11. Какова структура пакета данных в HART-протоколе?
12. Какие существуют риски при работе с HART-протоколом?
13. Как работает ASI-интерфейс?
14. Каковы основные черты протокола Fieldbus?
15. Как работает формат Bluetooth mesh?
16. Что называется влияющими величинами?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии были кратко рассмотрены современные методы и средства измерения ряда тепловых и химических величин, а также некоторые теоретические вопросы метрологии, метрологических характеристик средств измерения, работы метрологической службы предприятия и метрологического обеспечения АСУТП. Также книга кратко затрагивает такие актуальные в современном мире вопросы как неопределенность результатов измерений и её составляющие, международные метрологические организации и международное сотрудничество в области метрологии, организацию информационно-измерительных систем на базе беспроводных сетей и т.д.

Учебное пособие ни в коем случае не является всеобъемлющим и не претендует на полноту, но на базе усвоенной информации читатель в дальнейшем при желании может самостоятельно расширять свои знания в интересующей его сфере метрологии и теплотехнических измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.256-77. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. – Введ. 1978-07-01.
2. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. Введ. 1978-07-01.
3. ГОСТ 8.061-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. – Введ. 1981-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 11 с.
4. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики. Общие требования. Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 26 с.
5. ГОСТ 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Общие положения. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.
6. ГОСТ Р 54500.1 – 2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 Неопределенность измерения. Введение в руководства по неопределенности измерения. – Введ. 2011-11-16. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
7. ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – Введ. 2012-10-1. – М.: Стандартинформ, 2012. – 107 с.
8. ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства (СПДС) Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации на схемах. – Введ. 2014-11-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 31 с.
9. ГОСТ 8.000-15. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения.
10. Правила по межгосударственной стандартизации ПМГ 96-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристика качества измерений. Формы представления. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 11 с.

11. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 2015-01-10. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.

12. Рекомендации по метрологии Р 50.2038-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений. – Введ. 2005-01-01. – М.: Стандартинформ, 2001. – 12 с.

13. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 91-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». – Введ. 2010-02-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.

14. Рекомендации Ми 2230-92. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика количественного обоснования повсрочных схем при их разработке. – С.-Петербург: НПО ВНИИ им. Д.И. Менделеева, 1992. – 25 с.

15. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

## КНИГИ И ПЕЧАТНЫЕ ИЗДАНИЯ

16. Авдеева, А.А. Хроматография в энергетике / А.А. Авдеева. – М.: Энергия, 1980. – 264 с.

17. Большев, А. Атаки на низкоуровневые протоколы АСУ ТП на примере HART / А. Большев // Газета для корпоративных пользователей информационных технологий и решений «PC Week/RE». – 2014. – №12 (867). – С. 14.

18. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

19. Егошина, О.В. Системы химико-технологического мониторинга: учеб. пособие / О.В. Егошина. – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 48 с.

20. Захарова, Л.М. / Теплотехнический контроль и автоматизация технологических процессов ТЭС и АЭС / Л.М. Захарова, В.С. Мухин. – М.: МЭИ, 2013. – 195 с.

21. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 450 с.
22. Контроль и автоматика. №1, 2005. Стр. 9-12. НПФ КонтрАвт. – Нижний Новгород, 2005. – 34 с.
23. Кремлёвский, П.П. Расходомеры и счетчики количества / П.П. Кремлёвский. – 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1989. – 775 с.
24. Лежнина, И.А. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / И.А. Лежнина, А.А. Уваров. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 – 120 с.
25. Международный словарь по метрологии – основные и общие понятия и соответствующие термины: пер.с англ., и фр. / Всерос. науч.- исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус. Гос. Ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 84 с.
26. Павленко, В.А. Газоанализаторы / В.А. Павленко. – Л.: Машиностроение, 1965. – 296 с.
27. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике / Г.П. Плетнев. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – 352 с.
28. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – 3-е изд. М.: Энергия 1978. 702 с.
29. Приборы контроля окружающей среды / под ред. В.Е. Манойлова. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
30. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учебник / В.Я. Ротач. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.
31. Словарь OIML VI. Международный словарь терминов по законодательной метрологии (VIML): пер. с англ./ВНИИМС. Париж: Международная организация законодательной метрологии, 2013. – 60 с.
32. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – 4-е изд., перенабр. и доп. – М.: издательский дом МЭИ, 2008. – 464 с.
33. Фетисов, В.С. Протокол информационного обмена HART в измерительных и управляющих системах: учебное пособие / В.С. Фетисов. – Уфа: Фотон, 2011. – 87 с.
34. Химический контроль на тепловых и атомных электростанциях / под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.



35. Шишмарёв, В.Ю. Метрология, стандартизация, сертификация и техническое регулирование: учебник / В.Ю. Шишмарёв. – 6-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2016. – 320 с.

36. JCGM 100:2008 Guidance in Uncertainty of Measurements 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements. – JCGM, 2010. – 120 с.

37. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal and Radiation Measurement. / под редакцией John G. Webster и Halit Eren. – Бока Ратон: CRC Press. Taylor&Francis Group, 2014. – 1606 с.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗДАНИЯ

38. Энергетика и промышленность России. №5(121). Март 2009 года. 15-летний опыт работы ЗАО «Интеравтоматика». URL: <https://www.cprussia.ru/cpr/121/9307.htm>. Дата доступа: 15.08.2020.

39. Горбунов, А.И., Сердюков, О.В. О кодировании на электростанциях. URL: <https://tornado.nsk.ru/upload/iblock/517/10-04-08-cuoircrfjff%20evpi%20urfukdxpvczgxmaahpiyu.pdf>. Дата доступа: 15.08.2020.

40. Стельмах, С. Bluetooth Mesh свяжет «умные» устройства / Интернет-издание itweek. URL: <http://www.itweek.ru/iot/article/detail.php?ID=196450>. Дата доступа: 15.08.2020.

41. Технологические кодировки МЭК 61346 и KKS. URL: <http://www.adastra.ru/products/overview/kks>. Дата доступа 15.08.2020.

42. Официальная страница Костромской ГРЭС в социальной сети Facebook. URL: <https://www.facebook.com/KostromaGRES>. Дата доступа 20.09.2020.

43. Официальный сайт ООО «Фирма «Альфа Бассенс». URL: <https://alfabassens.ru/>. Дата доступа 10.08.2020.

44. Официальный сайт ООО «Асвега-комплект». URL: <http://aswegas.ru/>. Дата доступа: 15.08.2020.

45. Официальный сайт ГК «Взлст». URL: [vzljot.nt-rt.ru](http://vzljot.nt-rt.ru). Дата доступа 15.08.2020.

46. Официальный сайт ООО Взор. URL: <http://vzornn.ru/>.  
Дата доступа 10.08.2020.
47. Официальный сайт ООО Инэкотех.  
URL: <http://inekotex.com/>. Дата доступа 10.08.2020.
48. Официальный сайт компании Овен.  
URL: [www.owen.ru](http://www.owen.ru). Дата доступа: 15.08.2020.
49. Официальный сайт НВТ Системы.  
URL: <https://nvtsys.ru/>. Дата доступа: 15.08.2020.
50. Официальный сайт компании Текон.  
URL: <https://tecon.ru/>. Дата доступа: 15.08.2020.
51. Официальный сайт ГК «Теплоприбор».  
URL: [теплоприбор.рф](http://теплоприбор.рф). Дата доступа 15.08.2020.
52. Официальный сайт НПП Техноприбор.  
URL: <https://technopribor.ru/>. Дата доступа 10.08.2020.
53. Официальный сайт фирмы Элемср.  
URL: <https://www.clemcg.ru>. Дата доступа 15.08.2020.
54. Программно-технический комплекс КВИНТ-СИ.  
URL: <http://www.kvintsystem.ru/>. Дата доступа 15.08.2020.
55. Официальный сайт компании Emerson.  
URL: <https://www.emerson.ru>. Дата доступа: 15.08.2020.
56. Официальный сайт фирмы Endress+Hauser.  
URL: [www.endress.com](http://www.endress.com). Дата доступа 10.08.2020.
57. Официальный сайт фирмы Mettler Toledo.  
URL: [www.mt.com](http://www.mt.com). Дата доступа 10.08.2020.
58. Официальный сайт фирмы Swan Analytical Instruments.  
URL: <https://www.swan.ch/>. Дата доступа 10.08.2020.

*Учебное издание*

Долбикова Нина Сергеевна  
Захарова Людмила Михайловна  
Кузнецова Анна Викторовна  
Мерзликina Елена Игоревна  
Никитина Ирина Сергеевна  
Цыпин Александр Владимирович

# МЕТРОЛОГИЯ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебник

Редактор Т.А. Фоктистова  
Компьютерная верстка М.К. Петушкеевой

---

Подписано в печать 21.05.21. Печать офсетная. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 18,25. Тираж 500 экз. Изд. № 20у-116 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.