

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В СИСТЕМАХ ТГВ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальности 1-70 04 02
«Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

Составление и общая редакция
Н.В. Чепиковой

Новополоцк 2005

УДК 681.5 (075.8)

ББК 34.9 я 73

Т 38

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А.С. ВЕРШИНИН, канд. техн. наук, инженер-электроник ОАО «Нафтан»;

А.П. ГОЛУБЕВ, ст. преподаватель кафедры технической кибернетики

Рекомендован к изданию методической комиссией радиотехнического факультета

Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ: Учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-70 04 02 / Сост. и общ. ред. Н.В. Чепиковой. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2005. – 200 с.
ISBN 985-418-367-X

Соответствует учебной программе дисциплины «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ» для специализации 1-70 04 02-01 специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна».

Рассмотрены назначение систем автоматического контроля; принципы действия и конструкции контрольно-измерительных приборов, автоматических регуляторов и управляющих устройств, широко применяемых при автоматизации систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, водоснабжения и водоотведения.

Приведены темы изучаемого курса, их объем в часах лекционных и практических занятий, изложены теоретические и практические основы по техническим средствам автоматизации и вычислительной технике, применяемым в схемах автоматизации систем ТГВ. Представлены задания для практических занятий, рекомендации по организации рейтингового контроля изучения дисциплины, вопросы к зачету.

Предназначен для преподавателей и студентов вузов данной специальности.

Может быть использован студентами специализации 1-70 04 03-02 специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов».

УДК 681.5 (075.8)

ББК 34.9 я 73

ISBBN 985-418-367-X

© УО «ПГУ», 2005
© Чепикова Н.В., сост., 2005

СОДЕРЖАНИЕ

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ	5
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ	8
СТРУКТУРА УЧЕБНОГО КУРСА	10
Модуль 1	14
Модуль 2	16
Модуль 3	18
Модуль 4	24
Модуль 5	27
УЧЕБНЫЙ МАТЕРИАЛ	30
Глава 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	30
1.1. Измерение параметров технологических процессов.	
Принципы и методы измерений	30
1.2. Погрешности измерений. Виды и группы погрешностей	32
Глава 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ	37
2.1. Классификация измерительной аппаратуры и датчиков	37
2.2. Государственная система промышленных приборов.	
Стандартизация и унификация средств автоматизации	42
2.3. Определение погрешностей прибора	50
Глава 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ТГВ	53
3.1. Контактный метод измерения температуры	53
3.2. Измерение температуры термоэлектрическим методом	66
3.3. Неконтактный метод измерения температуры	68
3.4. Методы и средства измерения давления	71
3.5. Расчет жидкостно-механических манометров	80
3.6. Методы и средства измерения влажности	81
3.7. Методы и средства измерения расхода и количества вещества	87
3.8. Измерение расхода с помощью расходомеров скоростного напора ..	101
3.9. Методы и средства для определения состава и физико-химических свойств вещества	104
3.10. Методы и средства измерения уровня	111
3.11. Измерение уровня неагрессивной жидкости в открытом резервуаре с применением дифманометров	119
Глава 4. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ	122
4.1. Усилительно-преобразовательные устройства	122

4.2. Регулирующие органы	134
4.3. Расчет регулирующего органа для регулирования расхода воды	139
4.4. Исполнительные механизмы	142
4.5. Автоматические регуляторы	147
4.6. Выбор регуляторов на основании расчетов	159
Глава 5. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ	162
5.1. Классификация и назначение систем телемеханики	162
5.2. Системы телеизмерения, телеуправления, и телесигнализации	168
5.3. Условно-графическое обозначение приборов и средств автоматизации	172
5.4. Принципы построения управляющих вычислительных комплексов	176
5.5. Назначение и общая характеристика промышленных контроллеров	182
5.6. Правила позиционного обозначения приборов и средств автоматизации	189
Приложение	193
ЛИТЕРАТУРА	198

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель преподавания дисциплины

Основной целью преподавания дисциплины «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ» является получение студентами комплекса знаний по техническим средствам автоматизации и вычислительной техники, применяемых в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Основные задачи дисциплины:

- изучение студентами назначения и устройства технических средств автоматизации и вычислительной техники;
- приобретение студентами навыков в выборе и расчете технических средств автоматизации, применяемых для построения систем технологического контроля, автоматизированных систем управления технологическими процессами теплогазоснабжения и вентиляции.

Для достижения поставленной цели и решения поставленных задач в результате изучения дисциплины «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ» студент должен:

- *иметь представление:*
 - об основных принципах и задачах автоматизированного управления процессами в системах ТГВ;
 - о классификации подсистем автоматизации;
 - о принципах построения функциональных схем автоматического регулирования;
- *знать:*
 - принцип действия, устройство, характеристики основных технических средств автоматизации, включая микропроцессорную технику;
 - методы, принципы, средства контроля основных параметров технологических процессов в системах ТГВ;
 - принципиальные конструктивные решения систем автоматизации.

- *уметь использовать:*
 - методику анализа исходных данных при разработке расширенного технического задания на проектирование схем автоматизации систем ТГВ;
 - современные достижения при выборе средств автоматизации;
 - документы по соблюдению требований стандартизации и метрологического обеспечения технических средств автоматизации;
 - пакеты автоматизированного проектирования для выбора и расчета технических средств;
- *владеть* методами выбора технических средств из совокупности существующих применительно к конкретной задаче;
- *иметь опыт* работы с измерительными приборами.

1.3. Место дисциплины в учебном процессе

Курс является дисциплиной специализации в подготовке инженера-строителя по специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» и частью дисциплины «Автоматизированное управление процессами в системах ТГВ». Знания, полученные в результате изучения данной дисциплины необходимы при выполнении раздела по автоматизации в дипломном проекте.

Перечень дисциплин, необходимых студентам для изучения данной дисциплины:

- высшая математика (дифференциальные и интегральные исчисления, линейные и нелинейные дифференциальные уравнения);
- физика (гидравлика, механика);
- электротехника и электрооборудование;
- вычислительная техника и информатика;

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ», согласно учебному плану по специальности читается на 5-м курсе обучения, в осеннем семестре (18 учебных недель) и включает в себя:

- 36 часа лекционных занятий (2 часа в неделю);
- 18 часов практических занятий (девять 2-х часовых практических занятий).

Итоговой формой контроля знаний по данному курсу является зачет.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Наименование разделов и тем лекций	Количество часов
1. Назначение и основные функции системы автоматического контроля	2
2. Измерительные приборы и датчики	4
3. Методы и средства измерения основных параметров в системах ТГВ	14
4. Промежуточные устройства систем	8
5. Способы передачи информации в системах	8

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Наименование работы	Количество часов
1. Определение погрешности и класса точности прибора	2
2. Измерение температуры термоэлектрическим методом	2
3. Расчет жидкостно-механических манометров	2
4. Измерение расхода с помощью расходомеров скоростного напора	2
5. Измерение уровня с помощью дифманометров	2
6. Расчет и выбор регулирующего органа	2
7. Выбор типа автоматического регулятора	2
8. Условно-графическое обозначение приборов и средств автоматизации на функциональных схемах	2
9. Правила позиционного обозначения приборов и средств автоматизации на функциональных схемах	2

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Для изучения дисциплины «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ» предлагается модульная система. Весь материал разбит на пять тематических модулей для использования на лекционных и практических занятиях, причем каждый модуль содержит определенное количество учебных элементов (УЭ). Каждый УЭ рассчитан на 2 учебных часа лекционных занятий. Учебные элементы, содержащие практические занятия по дисциплине, рассчитаны на 2 аудиторных часа. Все УЭ содержат руководство к обучению, состоящее из комплексной цели, показывающей требования к умениям, знаниям и навыкам, которыми должны овладеть студенты в процессе изучения данного УЭ. В конце каждого модуля имеется УЭ контроля, представляющий собой набор вопросов, заданий и упражнений, которые необходимо выполнить после изучения модуля. Если студент уверен, что обладает достаточными знаниями, умениями и навыками, то необходимо пройти запланированную форму контроля. При неудачном выполнении выходного теста студенту потребуется вновь изучить данный модуль полностью.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Для оценки работы студентов в рамках данного курса предлагается рейтинговая система контроля успеваемости. Данная система является накопительной и предполагает суммирование баллов, выставляемых за все виды учебных активностей в течение прохождения курса. Итоговая сумма, набранная студентом за время прохождения курса, является индивидуальным рейтингом студента (ИРС). Правила назначения баллов рассмотрены далее, в соответствующих разделах содержания.

ЛЕКЦИОННАЯ ЧАСТЬ КУРСА

Целью лекционных занятий является освоение основной части теоретического материала по курсу.

Промежуточный контроль освоения теоретической части курса проводится в виде тестов, дважды в течение семестра, на аттестационных неделях. Тест состоит из 10 – 12 вопросов по пройденному материалу. Правильный ответ на вопрос оценивается в 5 баллов рейтинга. Дата проведения тестов объявляется заранее.

ПРАКТИКУМ

Целью практикума является освоение расчетов измерительных приборов и средств автоматизации, позволяющих установить физический смысл методов измерения применительно к конкретным условиям.

Результат каждого занятия оценивается в 10 баллов рейтинга.

АТТЕСТАЦИЯ

(промежуточный контроль успеваемости)

Для положительной аттестации индивидуальный рейтинг студента по всем учебным работам на момент аттестации должен составлять не менее $\frac{2}{3}$ от среднего ИРС в группе.

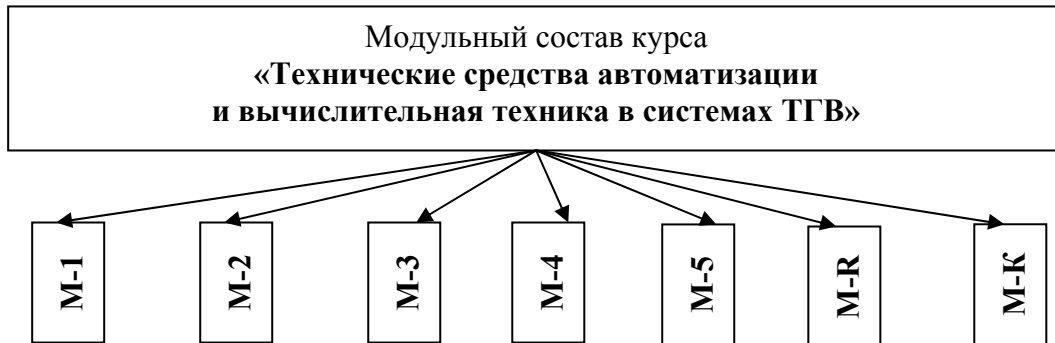
ЗАЧЕТ

(итоговый контроль успеваемости)

Зачет представляет собой письменный тест, на выполнение которого отводится 45 минут. Тест состоит из 18 вопросов с ответами выборочного типа, для получения зачета необходимо не менее 12 верных ответов. Для допуска к зачету необходимо набрать не менее 70 баллов рейтинга по практикуму.

Зачетный тест проводится на зачетной неделе, время и место проведения объявляется заранее. Тест выполняется на специальном бланке, выданным преподавателем. Пользование конспектом запрещено. Студенты, имеющие индивидуальный суммарный рейтинг по результатам семестра на 50 или более процентов больше, чем средний в группе, получают зачет автоматом.

СТРУКТУРА УЧЕБНОГО КУРСА



М-1 – Назначение и основные функции системы автоматического контроля (САК).

М-2 – Измерительные приборы и датчики.

М-3 – Методы и средства измерения основных параметров в системах ТГВ.

М-4 – Промежуточные устройства систем.

М-5 – Способы передачи информации в системах.

М-R – Обобщение по дисциплине.

М-K – Выходной итоговый контроль.

ВОПРОСЫ, ИЗУЧАЕМЫЕ НА ЛЕКЦИОННЫХ ЗАНЯТИЯХ (ПО МОДУЛЯМ)

Модуль 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Основные параметры технологических процессов в системах ТГВ. Измерение параметров технологических процессов в системах ТГВ (понятие измерения). Автоматический контроль сред в системах ТГВ. Назначение и основные функции системы автоматического контроля (САК). Принципы и методы измерений. Точность измерений. Погрешность измерений. Виды и группы погрешностей.

Модуль 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

Классификация измерительной аппаратуры и датчиков. Измерительный прибор. Первичный преобразователь (понятие и определение датчика). Статические и динамические характеристики датчиков. Государственная система промышленных приборов. Вторичные приборы САК.

Модуль 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ТГВ

Жидкостные термометры расширения. Термометры расширения твердых тел. Манометрические термометры. Термоэлектрические термометры. Термометры сопротивления.

Оптические пирометры излучения. Радиационные пирометры излучения.

Жидкостные, колокольные, пружинные, мембранные, сильфонные манометры. Тензорезисторные преобразователи.

Психрометрический метод измерения. Принцип действия психрометра. Метод точки росы. Электролитический метод измерения. Электролитические датчики влажности. Принцип работы и конструктивное исполнение этих датчиков.

Расходомеры переменного перепада давления. Виды сужающих устройств. Расходомеры постоянного перепада давления. Конструкции, принцип действия. Ультразвуковой метод измерения расхода. Счетчики количества. Вихревые расходомеры. Электромагнитные расходомеры.

Электрические методы анализа газов. Электрический газоанализатор. Кондуктометрический метод измерения. Принцип действия кондуктометрического газоанализатора. Тепловой, магнитный метод измерения. Термомагнитный кислородомер. Химический газоанализатор.

Поплавковые, гидростатические, электрические, акустические уровнемеры.

Модуль 4. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ

Усилители. Сравнение гидравлических, пневматических, электрических усилителей. Реле. Многокаскадное усиление.

Гидравлические, электрические, пневматические исполнительные механизмы.

Характеристики распределительных органов. Основные типы распределительных органов. Регулирующие устройства.

Классификация автоматических регуляторов. Основные свойства регуляторов. Выбор типа регулятора. Выбор оптимальных значений параметров регулятора.

Модуль 5. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ

Классификация и назначение систем телемеханики. Системы телеуправления, телесигнализации, телеизмерения.

Принципы построения управляющих вычислительных комплексов.
Особенности эксплуатации УВК в системах.

Назначение и общая характеристика промышленных контроллеров.

Модуль R. ОБОБЩЕНИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Обобщить наиболее существенные знания по дисциплине, выразить их в форме краткого резюме. Для этого ответьте на следующие вопросы:

1. В чем заключаются основные функции системы автоматического контроля?

2. Перечислите основные требования, предъявляемые к техническим средствам автоматизации.

3. Что такое принцип, метод измерения?

4. Как определяется класс точности прибора?

5. Как классифицируются приборы и средства автоматизации?

6. Что такое «датчик»?

7. Перечислите основные статические и динамические характеристики датчиков.

8. Что такое ГСП? Поясните назначение и предпосылки создания ГСП.

9. В чем назначение вторичных приборов в системе автоматического контроля?

10. Перечислите методы и средства измерения температуры, давления, влажности, расхода, уровня, состава и физико-химических свойств вещества.

11. Назовите основное назначение усилителей в САР.

12. Что такое многокаскадное усиление?

13. В чем заключается назначение регулирующего органа?

14. Назовите основные характеристики РО.

15. Какие виды исполнительных устройств вы знаете?

16. Перечислите основные требования, предъявляемые к исполнительным устройствам.

17. Назовите основные характеристики сервомоторов.

18. Как классифицируют электрические двигатели?

19. Что такое регулятор?

20. По каким признакам классифицируются регуляторы?

21. Какие основные свойства регуляторов вы знаете?

22. Перечислите функции, выполняемые устройствами телемеханики, применяемые в системах ТГВ.

23. Для чего применяют телеизмерение в системах ТГВ?
24. Что позволяет осуществлять телеуправление?
25. Для чего используется телесигнализация?
26. Что представляет собой УВК?
27. Назовите отличия УВК от универсальных ЭВМ.
28. Для чего необходимо использование промышленных контроллеров?
29. Назовите современные тенденции построения промышленных контроллеров.
30. Перечислите базовые функции промышленного контроллера.

Модуль К. ВЫХОДНОЙ ИТОГОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Итак, вы изучили дисциплину «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ».

После изучения данной дисциплины вы должны:

- иметь представление об основных принципах и задачах автоматизированного управления процессами в системах ТГВ;
- знать методы и средства измерения основных параметров технологических процессов в системах ТГВ;
- знать принцип действия, устройство, характеристики основных технических средств автоматизации, включая микропроцессорную технику;
- уметь использовать современные достижения при выборе технических средств автоматизации, документы по соблюдению требований стандартизации и метрологического обеспечения технических средств автоматизации;
- владеть методами выбора технических средств из совокупности существующих применительно к конкретной задаче.

По окончании изучения дисциплины «Технические средства автоматизации и вычислительная техника в системах ТГВ» Вам необходимо сдать зачет.



УЭ-1 – Назначение и основные функции САК. Погрешность измерений. Виды и группы погрешностей.

УЭ-К – Выходной контроль по модулю.

Модуль 1. Назначение и основные функции системы автоматического контроля
Руководство по обучению
УЭ-1. Назначение и основные функции САК. Принципы и методы измерений. Виды и группы погрешностей Учебные цели УЭ-1 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> об основных параметрах технологических процессов системах ТГВ; ❖ <i>знать</i>: - назначение и основные функции системы автоматического контроля, - принципы и методы измерений, - определения точности и погрешности измерений, - основные виды и группы погрешностей, - понятия класса точности прибора, поверки, юстировки прибора; ❖ <i>владеть</i> методикой расчета погрешностей и определением класса точности прибора; ❖ <i>уметь</i> производить выбор прибора по справочной литературе. Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить п.п. 1.1 – 1.4 учебного материала УМК.
УЭ-К. Выходной контроль по модулю После изучения данного модуля Вам необходимо проверить свои знания, ответив на вопросы и выполнив тестовые задания: 1. Назовите основные параметры технологических процессов в системах ТГВ. 2. В чем заключаются основные функции системы автоматического контроля? 3. Перечислите основные требования, предъявляемые к техническим средствам автоматизации. 4. Что понимают под «измерением»? 5. Какие бывают измерения? 6. Что такое принцип, метод измерения? 7. Дайте определение точности и погрешности измерения. 8. Какие виды погрешностей вы знаете? 9. Как определяется класс точности прибора? 10. Что называют поверкой прибора? 11. Для чего производится градуировка и юстировка приборов?

Тестовое задание:

1. Измерительный прибор относится к классу точности 2,5. Какую погрешность характеризует этот класс:

а) систематическую; б) случайную; в) грубую?

2. К каким видам погрешностей надо относить погрешность, возникающую при изменении сопротивления соединительных линий у электрических термометров в связи с колебаниями температуры атмосферного воздуха:

а) систематическим, основным; б) систематическим, дополнительным;

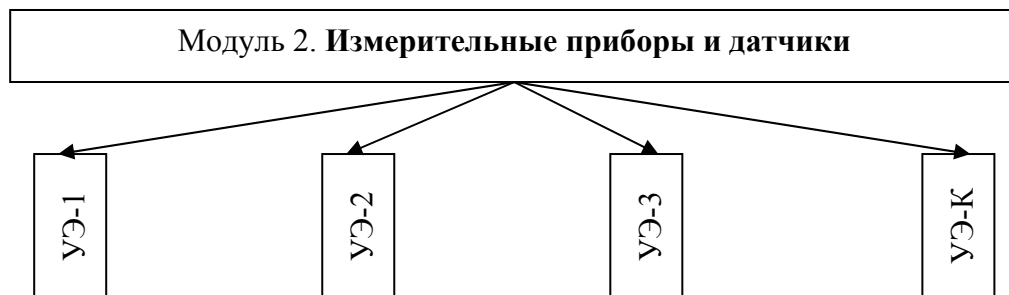
в) случайным, основным; г) случайным, дополнительным?

3. Каким методом измерения следует считать измерение уровня с помощью водомерной стеклянной трубки (сообщающегося сосуда):

а) непосредственной оценки; б) нулевым?

4. Включается ли юстировка средств измерений в комплекс операций по поверке:

а) включается; б) не включается?



УЭ-1 – Классификация измерительной аппаратуры и датчиков.

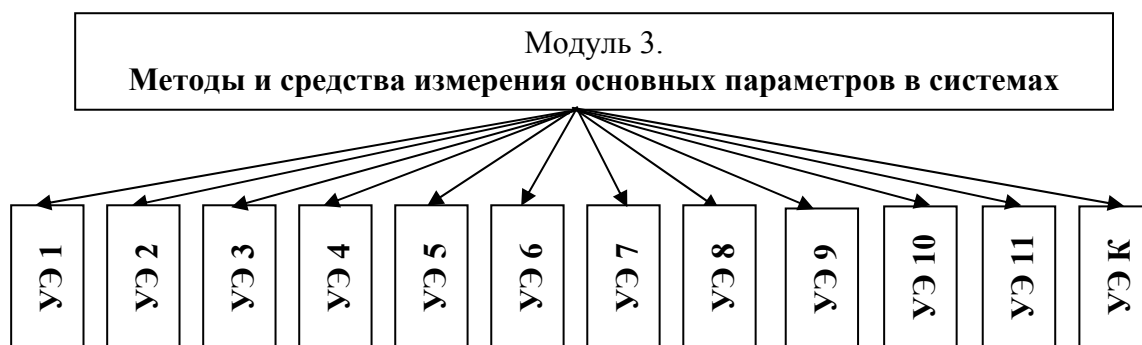
УЭ-2 – Государственная система приборов. Вторичные приборы САК.

УЭ-3 – Практическое занятие № 1.

УЭ-К – Выходной контроль по модулю.

Модуль 2. Измерительные приборы и датчики
Руководство по обучению
УЭ-1. Классификация измерительной аппаратуры и датчиков Учебные цели УЭ-1 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - о назначении приборов и средств автоматизации, - о классификации измерительных приборов; ❖ <i>знать:</i> - понятие «измерительный прибор», - определение «первичный измерительный преобразователь», «промежуточный измерительный преобразователь», «передающий преобразователь», - понятие «чувствительный элемент», - классификацию датчиков, - основные статические и динамические характеристики датчиков; ❖ <i>владеть</i> методикой расчета статических и динамических характеристик датчика; ❖ <i>уметь</i> производить выбор датчиков по их характеристикам. Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить п.2.1 учебного материала УМК.
УЭ-2. Государственная система приборов. Вторичные приборы САК Учебные цели УЭ-2 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - о стандартизации и унификации приборов, - о предпосылках создания ГСП, - о назначении вторичных приборов в системе автоматического контроля; ❖ <i>знать:</i> - назначение ГСП, - классификацию приборов по виду носителей информации, - классификацию приборов по функциональному признаку,

- классификацию вторичных приборов, - конструкцию и принцип действия приборов прямого преобразования и приборов уравнивания; ❖ <i>владеть</i> методикой выбора вторичных приборов в зависимости от метода измерения; ❖ <i>уметь</i> работать со справочной литературой. Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить п.п. 2.2 учебного материала УМК.
УЭ-3. Практическое занятие № 1 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 2.3 учебного материала УМК (определение погрешностей прибора).
УЭ-К Выходной контроль по модулю После изучения данного модуля Вам необходимо проверить свои знания, ответив на вопросы и выполнив тестовые задания: 1. Чем отличается измерительный прибор от остальных измерительных преобразователей? 2. Каково назначение промежуточных преобразователей? 3. Как классифицируются приборы и средства автоматизации? 4. Дайте определение «первичный преобразователь» - это ... 5. Продолжите «чувствительный элемент – это ... 6. Перечислите основные статические и динамические характеристики датчиков. 7. Какие эксплуатационные требования предъявляются к датчикам? 8. Что такое ГСП? Поясните назначение и предпосылки создания ГСП. 9. Для чего предусмотрены различные виды унифицированных сигналов? 10. В чем назначение вторичных приборов в системе автоматического контроля? 11. Как классифицируются вторичные приборы? 12. Для чего применяются автоматические мосты в системах ТГВ?



- УЭ-1 – Контактный метод измерения температуры.
 УЭ-2 – Практическое занятие № 2.
 УЭ-3 – Неконтактный метод измерения температуры.
 УЭ-4 – Методы и средства для измерения давления.
 УЭ-5 – Практическое занятие № 3.
 УЭ-6 – Методы и средства для измерения влажности газов (воздуха).
 УЭ-7 – Методы и средства для измерения расхода и количества.
 УЭ-8 – Практическое занятие № 4.
 УЭ-9 – Методы и средства для определения состава и физико-химических свойств вещества.
 УЭ-10 – Методы и средства для измерения уровня.
 УЭ-11 – Практическое занятие № 5.
 УЭ-К – Контроль по модулю.

Модуль 3. Методы и средства для измерения основных параметров в системах ТГВ
Руководство по обучению
УЭ-1. Контактный метод измерения температуры Учебные цели УЭ-1 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - об основных методах измерения температуры, - об особенностях контактных измерителей температуры; ❖ <i>знать:</i> - основные технические характеристики, устройство и конструкцию датчиков с механическими выходными величинами, - основные технические характеристики, устройство и конструкцию датчиков с электрическими выходными величинами, - диапазон измерения этих датчиков, схемы включения, - погрешности температурных измерений контактными датчиками; ❖ <i>владеть</i> навыками расчета измерения температуры термоэлектрическим методом; ❖ <i>уметь</i> производить выбор датчиков температуры по каталогам и справочникам. Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить п. 3.1 учебного материала УМК (контактный метод измерения температуры).

УЭ-2. Практическое занятие № 2 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 3.2 учебного материала УМК (измерение температуры термоэлектрическим методом).
УЭ-3. Неконтактный метод измерения температуры Учебные цели УЭ-3 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - об основных способах измерения температуры неконтактным методом, - об особенностях бесконтактных измерителей температуры; ❖ <i>знать:</i> - основные технические характеристики, устройство пирометров, - диапазон измерений, - погрешности температурных измерений с помощью пирометров, методы их уменьшения; ❖ <i>уметь использовать</i> знания для выбора пирометров в зависимости от их характеристик по каталогам и справочникам. Для успешного овладения материалом УЭ-3 следует изучить п. 3.3 учебного материала УМК (неконтактный метод измерения температуры).
УЭ-4. Методы и средства для измерения давления (разрежения) Учебные цели УЭ-4 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - о методах измерения давления, - о единицах измерения давления; ❖ <i>знать:</i> - классификацию приборов для измерения давления в зависимости от измеряемой величины, - классификацию приборов для измерения давления в зависимости от принципа действия, - конструкцию, принцип действия, диапазон измерений датчиков давления, - достоинства и недостатки этих приборов; ❖ <i>владеть</i> методами выбора датчиков давления из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе датчиков давления в схемах автоматизации систем ТГВ. Для успешного овладения материалом УЭ-4 следует изучить п. 3.4 учебного материала УМК (методы и средства для измерения давления)
УЭ-5. Практическое занятие № 3 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 3.5 учебного материала УМК (расчет жидкостно-механических манометров).
УЭ-6. Методы и средства для измерения влажности газов Учебные цели УЭ-6 Студент должен: ❖ <i>иметь представление:</i> - о влажности, как о физическом параметре, - об относительной, абсолютной влажности, - об энтальпии, - о температуре точки росы;

❖ <i>знать</i>: - психрометрический, электролитический методы измерения влажности, - метод точки росы, - принцип действия и конструктивное исполнение датчиков, используемых для измерения влажности, диапазон измерений, - достоинства и недостатки датчиков влажности; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе датчиков влажности в схемах автоматизации систем ТГВ; ❖ <i>владеть</i> методами выбора датчиков влажности из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче. Для успешного овладения материалом УЭ-6 следует изучить п. 3.6 учебного материала УМК (методы и средства для измерения влажности).
УЭ-7. Методы и средства для измерения расхода Учебные цели УЭ-7 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i>: - о методах измерения расхода, - о единицах измерения расхода, - о группах расходомеров; ❖ <i>знать</i>: - виды сужающих устройств, - конструкцию, принцип действия, диапазон измерений расходомеров переменного перепада давления, постоянного перепада давления, ультразвуковых расходомеров, тепломеров, - конструктивное исполнение и принцип действия счетчиков количества, - погрешности измерения этих устройств; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе расходомеров в схемах автоматизации систем ТГВ; ❖ <i>владеть</i> методами выбора сужающих устройств и расходомеров из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче. Для успешного овладения материалом УЭ-7 следует изучить п. 3.7 учебного материала УМК (методы и средства для измерения расхода и количества).
УЭ-8. Практическое занятие № 4 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 3.8 учебного материала УМК (измерение расхода с помощью расходомеров скоростного напора).
УЭ-9. Методы и средства для определения состава и физико-химических свойств вещества Учебные цели УЭ-9 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о физико-химических методах анализа газов; ❖ <i>знать</i>: - виды электрических методов измерения, - на чем основано действие электрических, кондуктометрических, кулонометрических газоанализаторов, - тепловой метод измерения, - магнитный метод измерения, - принцип действия приборов, в основу которых положены эти методы измерения, - принцип действия химических газоанализаторов; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе приборов для определения состава и физико-химических свойств вещества;

❖ <i>владеть</i> методами выбора этих приборов из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче. Для успешного овладения материалом УЭ-9 следует изучить п. 3.9 учебного материала УМК (методы и средства для определения состава и физико-химических свойств вещества).
УЭ-10. Методы и средства для измерения уровня Учебные цели УЭ-10 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> от чего зависит выбор метода контроля уровня жидкости; ❖ <i>знать</i>: - методы измерения уровня, - схемы измерений уровня жидкости, - устройство и принцип действия уровнемеров, сигнализаторов уровня, - диапазон измерений, - погрешности измерений; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе уровнемеров и сигнализаторов уровня в схемах автоматизации систем ТГВ; ❖ <i>владеть</i> методами выбора этих приборов из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче. Для успешного овладения материалом УЭ-10 следует изучить п. 3.10 учебного материала УМК (методы и средства для измерения уровня).
УЭ-11. Практическое занятие № 5 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 3.11 учебного материала УМК (измерение уровня неагрессивной жидкости в открытом резервуаре с применением дифманометров).
УЭ-К Выходной контроль по модулю После изучения данного модуля Вам необходимо проверить свои знания, ответив на вопросы или выполнив задания. Вопросы для предварительного контроля к УЭ-1: 1. Как устроены термометры расширения? 2. Для чего предназначены термометры сопротивления и термисторы? 3. Поясните метод измерения температуры термопарой. 4. Когда стеклянные термометры применяют в металлических оправах? 5. Что такое градуировочная характеристика термоэлектрического термометра? 6. Какие вторичные приборы применяют при измерении температуры термометрами сопротивления? 7. Чем отличается оправа стеклянных термометров типа А от типа Б? 8. Почему в жидкостных термометрах термобаллон должен быть расположен на одном уровне с манометрической пружиной? Тестовые задания к УЭ-1: 1. В каких манометрических термометрах термобаллон заполняется низкокипящей жидкостью и ее парами: а) в газовых; б) в конденсационных; в) в жидкостных? 2. Какими приборами из перечисленных ниже нельзя измерить температуру минус 80 °С: а) жидкостными термометрами, б) манометрическими термометрами, в) термометрами сопротивления?

3. Какими приборами из перечисленных ниже нельзя измерить температуру 800 °С:
а) термоэлектрическими термометрами, б) термометрами сопротивления?
4. Какие термопары (какой градуировки) наиболее правильно применить для измерения температуры 900 °С:
а) градуировки ПП-1; б) градуировки ХА; в) градуировки ХК?
5. Какие термопары (какой градуировки) можно применить для измерения температуры 1200 °С:
а) градуировки ПП-1; б) градуировки ХА; в) градуировки ХК?
6. В каких случаях может возникнуть в термопаре термоэдс:
а) при двух одинаковых (однородных) термоэлектродах и различных температурах рабочего и свободных концов?
б) при двух разнородных термоэлектродах и одинаковых температурах рабочего и свободных концов?
в) при двух разнородных термоэлектродах и различных температурах рабочего и свободных концов?
7. Какие термометры сопротивления наиболее рационально применить для измерения температуры минус 25 °С:
а) медные, б) платиновые, в) полупроводниковые?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-3:

1. Какую температуру тела измеряют оптические пирометры?
2. Какой способ измерения температуры лежит в основе работы пирометра?
3. Какие из перечисленных ниже длин волн воспринимаются при измерениях температуры оптическими пирометрами:
а) 0,55 мкм, б) 0,65 мкм; в) 0,75 мкм?
4. Какую температуру показывают фотоэлектрические пирометры:
а) яркостную, б) радиационную, в) действительную?
5. Как градуируются радиационные пирометры?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-4:

1. Что такое избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давление?
2. Можно ли дифманометром измерять давление? разрежение?
3. Как преобразуется измеряемое давление в пружинных и мембранных приборах для измерения давления?
4. Почему распрямляется пружина манометра под действием давления?
5. Что такое разделительная мембрана?
6. Чем отличается однотрубный манометр от U-образного?
7. Каковы основные источники погрешности при измерении U-образным манометром?
8. Что такое тензопреобразователь?
9. В чем заключается принцип действия датчика типа «Сапфир»?
10. Что является чувствительным элементом этого датчика?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-6

1. Дайте определение «Влажность – это...».
2. Продолжите предложение «Влажность воздуха оценивается ...».
3. Перечислите методы измерения влажности воздуха.
4. Где применяется гигроскопический метод измерения?

5. В чем заключается метод «точки росы»?
6. Каковы недостатки датчиков, основанных на этом методе?
7. Объясните смысл «электролитического метода» измерения влажности воздуха.
8. Назовите основной недостаток подогревных датчиков.

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-7

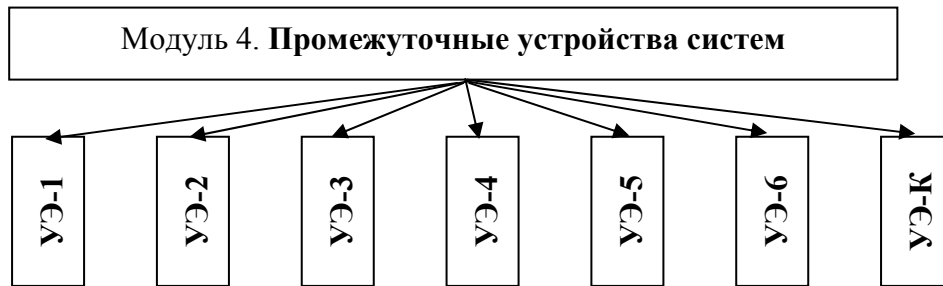
1. Продолжите предложение «Расход вещества – это...».
2. Как называют приборы для измерения расхода вещества? Для измерения количества вещества?
3. Перечислите группы расходомеров.
4. Какие виды сужающих устройств Вы знаете?
5. Почему всплывает поплавков в стеклянном ротаметре?
6. Чем отличается полный напор от скоростного?
7. Чем отличается перепад давления на сужающем устройстве от потери давления?
8. Как измеряется перепад давления в кольцевом дифманометре?
9. Перечислите достоинства и недостатки ультразвуковых расходомеров.
10. На чем основан принцип действия электромагнитных расходомеров?
11. Как разделяют счетчики количества по принципу действия?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-9

1. Назовите физико-химические методы анализа газов?
2. В чем заключается электрический метод измерения?
3. На чем основан принцип действия кондуктометрических, кулонометрических газоанализаторов?
4. Продолжите предложение «Тепловой метод измерения основан на ...».
5. В каких случаях используется магнитный метод измерения?
6. Каков принцип действия химических газоанализаторов?
7. Почему контроль качества горения осуществляется по кислороду?
8. Каков принцип действия термомагнитных кислородомеров?
9. Чем отличаются автоматические газоанализаторы от переносных и каковы их достоинства и недостатки?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-11

1. От чего зависит выбор метода измерения уровня?
2. Как классифицируются приборы измерения уровня?
3. Для чего используют дифманометр в схемах измерения уровня?
4. Повлияет ли избыточное давление в емкости на показания поплавкового уровнемера? Емкостного уровнемера?
5. Какие свойства измеряемой жидкости оказывают влияние на результат измерения гидростатического уровнемера?
6. Каковы различия между уровнемерами и сигнализаторами уровня?
7. Как устроен поплавковый уровнемер?
8. Почему изменяется емкость между электродами в зависимости от уровня?
9. Где размещаются источник и приемник ультразвуковых волн при измерении уровня?
10. Для чего нужен уравнительный сосуд при измерении уровня дифманометрами?



УЭ-1 – Усилительно-преобразовательные устройства.

УЭ-2 – Регулирующие органы.

УЭ-3 – Практическое занятие № 6.

УЭ-4 – Исполнительные механизмы.

УЭ-5 – Автоматические регуляторы.

УЭ-6 – Практическое занятие № 7.

УЭ-К – Контроль по модулю.

Модуль 4. Промежуточные устройства систем
Руководство по обучению
УЭ-1. Усилительно-преобразовательные устройства Учебные цели УЭ-1 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о назначении усилителя в системе автоматического регулирования; ❖ <i>знать</i>: - классификацию усилителей, - требования, предъявляемые к усилителям, - виды гидравлических, пневматических, электрических усилителей, - устройства релейного управления, - принцип действия электронных усилителей, - необходимость использования многокаскадного усиления; ❖ <i>владеть</i> методами выбора усилителей, реле из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче; ❖ <i>уметь использовать</i> современные достижения при выборе усилителей в схемах автоматизации; Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить п. 4.1 учебного материала УМК (усилительно-преобразовательные устройства).
УЭ-2. Регулирующие органы Учебные цели УЭ-2 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о роли распределительных органов; ❖ <i>знать</i>: - основные типы регулирующих органов, - характеристики регулирующих органов, - назначение регулирующих устройств; ❖ <i>владеть</i> методикой расчета регулирующих органов; ❖ <i>уметь использовать</i> справочную литературу и расчет при выборе регулирующих органов. Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить п. 4.2 учебного материала УМК (регулирующие органы).

УЭ-3. Практическое занятие № 6 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 4.3 учебного материала УМК (Расчет регулирующего органа для регулирования расхода воды).
УЭ-4. Исполнительные механизмы Учебные цели УЭ-4 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о роли исполнительных механизмов; ❖ <i>знать</i>: - принцип классификации сервомоторов, - основные характеристики сервомоторов, - структурные схемы электрических сервомоторов, - назначение гидравлических, пневматических исполнительных механизмов, - классификацию электродвигателей, - требования, предъявляемые к исполнительным устройствам; ❖ <i>владеть</i> методами выбора исполнительных устройств из совокупности существующих, применительно к конкретной задаче; ❖ <i>уметь использовать</i> справочную литературу при выборе исполнительных устройств. Для успешного овладения материалом УЭ-4 следует изучить п.4.4 учебного материала УМК (исполнительные механизмы)
УЭ-5. Автоматические регуляторы Учебные цели УЭ-5 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о назначении автоматических регуляторов в технологическом процессе; ❖ <i>знать</i>: - структуру автоматического регулятора, - классификацию автоматических регуляторов, - основные свойства регуляторов, - особенности регуляторов прерывного и непрерывного действия, - выбор оптимальных значений параметров регулятора, - критерии выбора регулятора по роду действия; ❖ <i>владеть</i> методами выбора регулятора на основании ориентировочных сведений об объекте; ❖ <i>уметь использовать</i> справочную литературу при выборе автоматического регулятора. Для успешного овладения материалом УЭ-5 следует изучить п. 4.5 учебного материала УМК (Автоматические регуляторы).
УЭ-6. Практическое занятие № 7 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 4.6 учебного материала УМК (Выбор регулятора на основании расчета по приведенной схеме регулирования).
УЭ-К. Выходной контроль по модулю После изучения данного модуля Вам необходимо проверить свои знания, ответив на вопросы или выполнив задания. Вопросы для предварительного контроля к УЭ-1 1. Назовите основное назначение усилителей в САР? 2. Как классифицируются усилители, сравните их.

3. Какие требования предъявляются к усилителям?
4. Что называют чувствительностью усилителя?
5. Где применяются пневмоусилители?
6. Что представляют собой золотниковые гидроусилители?
7. Что называют операционными усилителями?
8. Когда применяются электронные усилители?
9. Что такое многокаскадное усиление?
10. Где используется многокаскадное усиление?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-2

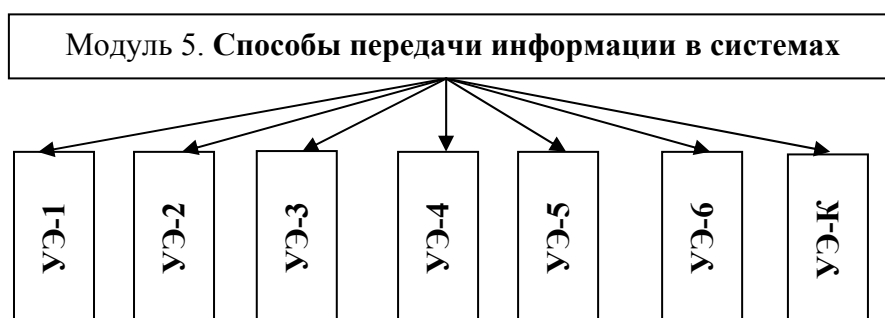
1. В чем заключается назначение регулирующего органа?
2. От чего зависят функциональные и конструктивные признаки регулирующих органов?
3. Какие регулирующие органы называют дроссельными, что они представляют собой?
4. Назовите основные характеристики РО.
5. Что выражает конструктивная характеристика РО?
6. При каких условиях строится расходная характеристика РО?
7. Перечислите недостатки односедельных клапанов.
8. Назовите условия установки РО.

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-4

1. Какие виды исполнительных устройств вы знаете?
2. Перечислите основные требования к исполнительным устройствам.
3. Назовите основные характеристики сервомоторов.
4. Как классифицируют электрические двигатели?
5. Для чего применяют электромагнитные приводы?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-5

1. По каким признакам классифицируются регуляторы?
2. Дайте определение «автоматический регулятор состоит из ...».
3. Перечислите регуляторы прерывного действия.
4. Какие регуляторы относятся к регуляторам непрерывного действия?
5. Как различают регуляторы в зависимости от используемого вида внешней энергии?
6. Какие основные свойства регуляторов Вы знаете?
7. Для чего в регуляторах применяют усилитель?



УЭ-1 – Классификация и назначение систем телемеханики.

УЭ-2 – Системы телеуправления, телесигнализации, телеизмерения.

УЭ-3 – Практическое занятие № 8.

УЭ-4 – Принципы построения УВК.

УЭ-5 – Назначение и общая характеристика контроллеров.

УЭ-6 – Практическое занятие № 9.

УЭ-К – Выходной контроль по модулю.

Модуль 5. Способы передачи информации в системах
Руководство по обучению
УЭ-1. Классификация и назначение систем телемеханики Учебные цели УЭ-1 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о способах передачи информации; ❖ <i>знать</i>: - классификацию и назначение телемеханических систем, - задачи телемеханики, - основные понятия о преобразовании информации, - функции устройств телемеханики, применяемых в системах, - понятия «канал», «сигнал», «помехоустойчивость», «модуляция»; ❖ <i>уметь использовать</i> полученные знания на практике. Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить п. 5.1 учебного материала УМК (классификация и назначение систем телемеханики).
УЭ-2. Системы телеуправления, телесигнализации, телеизмерения Учебные цели УЭ-2 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о системах телеизмерения, телеуправления и телесигнализации; ❖ <i>знать</i>: - назначение систем телеизмерения, - схемы телеизмерения ближнего и дальнего действия, - назначение систем телеуправления и телесигнализации, - классификацию устройств телеуправления, - назначение распределителей в системах телеуправления; ❖ <i>уметь использовать</i> полученные знания на практике. Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить п. 5.2 учебного материала УМК (системы телеуправления, телеизмерения и телесигнализации).

УЭ-3. Практическое занятие № 8 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 5.3 учебного материала УМК (условно-графическое обозначение приборов и средств автоматизации).
УЭ-4. Принципы построения УВК Учебные цели УЭ-4 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о роли ЭВМ в управлении технологическим процессом; ❖ <i>знать</i>: - предпосылки создания УВК, - функции УВК в управлении технологическим процессом, - отличие УВК от универсальных ЭВМ, - структурную схему включения УВК в замкнутый контур технологического процесса; ❖ <i>уметь использовать</i> справочную литературу по микропроцессорной технике. Для успешного овладения материалом УЭ-4 следует изучить п. 5.4 учебного материала УМК (принципы построения УВК).
УЭ-5. Назначение и общая характеристика промышленных контроллеров Учебные цели УЭ-5 Студент должен: ❖ <i>иметь представление</i> о необходимости использования контроллеров в системе управления технологическим процессом; ❖ <i>знать</i>: - функции и назначение промышленных контроллеров, - современные тенденции построения промышленных контроллеров, - аппаратные средства промышленных контроллеров; ❖ <i>уметь использовать</i> справочную литературу по промышленным контроллерам. Для успешного овладения материалом УЭ-5 следует изучить п. 5.5 учебного материала УМК (назначение и общая характеристика промышленных контроллеров).
УЭ-6. Практическое занятие № 9 Для выполнения этой работы необходимо ознакомиться с п. 5.6 учебного материала УМК (правила позиционного обозначения приборов и технических средств автоматизации).
УЭ-К. Выходной контроль по модулю После изучения данного модуля Вам необходимо проверить свои знания, ответив на вопросы: Вопросы для предварительного контроля к УЭ-1 1. Какова роль телемеханических систем в системе контроля? 2. Перечислите функции, выполняемые устройствами телемеханики, применяемые в системах ТГВ. 3. Перечислите основные задачи телемеханики. 4. Для чего применяют телеизмерение в системах ТГВ? 5. Что позволяет осуществлять телеуправление? 6. Для чего используется телесигнализация? 7. Дайте определение следующим понятиям: - Канал связи – ... - Сигнал – ... - Помехоустойчивость – ...

Импульс – ...

Модуляция – ...

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-2

1. Для чего применяют системы телеизмерения ближнего и дальнего действия?
2. Поясните принцип действия схемы телеизмерения дальнего действия.
3. В чем отличие систем телеуправления от систем дистанционного и местного управления?
4. Что такое избирательность?
5. Как классифицируются устройства телеуправления?
6. Для чего используют распределители?
7. Что используют в качестве распределителей?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-4

1. В связи с чем возникла идея использования ЭВМ с системе управления технологическим процессом?
2. Что представляет собой УВК?
3. Назовите отличия УВК от универсальных ЭВМ.
4. Через какие устройства осуществляется взаимодействие УВК с внешней средой?
5. Для чего нужны АЦП и ЦАП?
6. Какие функции выполняет устройство дискретного ввода сигналов?
7. Назовите функцию устройства вывода дискретных сигналов.
8. Для чего необходима система прерываний?
9. Каковы правила эксплуатации ЭВМ?

Вопросы для предварительного контроля к УЭ-5

1. Для чего необходимо использование ПК?
2. Назовите современные тенденции построения ПК.
3. Перечислите базовые функции ПК.
4. Что представляют собой аппаратные средства ПК?
5. Что обеспечивает память ПК?
6. Что реализуют средства коммуникации ПК?
7. Какую функцию выполняют устройства ввода-вывода?
8. Какую функцию выполняют средства индикации ПК?

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

1.1. Измерение параметров технологических процессов.

Принципы и методы измерений

Для качественного ведения любого технологического процесса необходим контроль за несколькими характерными величинами, называемыми параметрами процесса. В системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата основными параметрами являются температура, потоки теплоты, влажность, давление, расход, уровень жидкости и некоторые другие. В результате контроля необходимо установить, удовлетворяет ли фактическое состояние (свойство) объекта контроля заданным технологическим требованиям. Наблюдение за параметрами систем осуществляется с помощью средств контроля измерения.

С процесса измерения начинаются простые, а подчас и очень сложные процессы в автоматизированных системах, и от того с какой точностью измерена исходная величина, зависит результат дальнейшего преобразования в последующих элементах системы.

Суть *измерения* – получение количественной информации о параметрах путем сравнения текущего значения технологического параметра с некоторым его значением, принятым за единицу. Результатом измерения является представление о качественных характеристиках контролируемых объектов.

В *прямых измерениях* величину X и результат ее измерения Y находят непосредственно из опытных данных и выражают в одних единицах, $X = Y$. Например, значение температуры по показаниям стеклянного термометра.

В *косвенных измерениях* искомая величина Y функционально связана со значениями величин, измеряемых прямыми способами: $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Например, измерение расхода жидкости или газа по перепаду давления на сужающем устройстве.

Под *принципом измерения* понимают совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Средства измерений – меры, измерительные приборы, устройства и преобразователи.

Метод измерений – совокупность принципов и средств измерений. Известны три основных метода измерений: непосредственной оценки, сравнения с мерой (компенсационный) и нулевой. В методе *непосредственной оценки* значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству прибора, например, стеклянного термометра, пружинного манометра и т. п. Во втором случае – *компенсационный* метод – измеряемую величину сравнивают с мерой, например, эдс термопары с известной эдс нормального элемента. Эффект *нулевого метода* заключается в уравнивании измеряемой величины и известной. Он используется в мостовых схемах измерений.

В зависимости от расстояния между местом измерения и показывающим устройством измерения могут быть *локальными* или *местными*, *дистанционными* и *телеизмерениями*.

Наблюдение за параметрами систем осуществляется с помощью различных измерительных устройств. К ним относятся измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, называют *измерительным прибором*.

Средство измерения, вырабатывающее сигнал в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не позволяющее наблюдателю осуществить непосредственное восприятие, называют *измерительным преобразователем*.

Совокупность устройств, с помощью которых выполняются операции автоматического контроля, называется *системой автоматического контроля* (САК).

Основными функциями САК:

- восприятие контролируемых параметров с помощью датчиков,
- реализация заданных требований к контролируемому объекту,
- сопоставление параметров с нормами,
- формирование суждения о состоянии объекта контроля (на основании анализа этого сопоставления),
- выдача результатов контроля.

До появления автоматических управляющих устройств и цифровых вычислительных машин (ЦВМ) основным потребителем измерительной информации был экспериментатор, диспетчер. В современных САК измерительная информация от приборов поступает непосредственно в автоматические управляющие устройства. В этих условиях в основном использу-

ются электрические средства измерений, отличающиеся следующими преимуществами:

1) простота изменения чувствительности в широком диапазоне значений измеряемой величины. Использование электроники позволяет в тысячи раз усиливать электрические сигналы, а, следовательно, увеличивать чувствительность аппаратуры;

2) малая инерционность электрической аппаратуры или широкий частотный диапазон, что позволяет измерять как медленно, так и быстро изменяющиеся во времени величины;

3) возможность измерения на расстоянии, в недоступных местах, централизация и одновременность измерения многочисленных и различных по своей природе величин, то есть возможность создания комплексных измерительно-информационных систем (ИИС), передача результатов измерения на большие расстояния, математическая обработка и использование их для целей управления (создание управляющих систем);

4) возможность комплектования измерительных и обслуживаемых ими автоматических систем из блоков однотипной электрической аппаратуры, что имеет важнейшее значение для создания ИИС [9].

1.2. Погрешности измерений. Виды и группы погрешностей

Для исследования процессов, методов и средств контроля измерения целесообразно использовать основные положения теории информации. В теории информации рассматриваются такие ситуации, когда появление того или иного события (из числа возможных в данной ситуации) не может быть однозначно предсказано заранее.

Состояние контролируемых параметров можно рассматривать как случайные события, а процесс контроля – как ситуацию, в которой они могут происходить. Невозможность предсказания, какое из значений контролируемого параметра X будет на входе устройства контроля, позволяет считать появление этих значений случайными событиями. Количество информации в этом случае определяет, насколько полно можно судить о значениях параметра X по полученным результатам контроля.

Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называют *точностью измерения*. Точность измерения количественно характеризуется погрешностью измерения. Точность средств измерений отражает близость к нулю его погрешностей [9].

Погрешностью называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Различают абсолютную и относительную погрешности измерения.

Абсолютная погрешность средств измерений (прибора) ΔX равна разности между результатом измерения X_H и истинным значением измеряемой величины X :

$$\Delta X = X_H - X.$$

На практике вместо понятия «истинное значение» пользуются обычно понятием действительное значение измеряемой величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что оно может быть использовано вместо истинного.

Относительная погрешность δ_o представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta_o = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%.$$

В измерительной технике используется также понятие приведенной погрешности. *Приведенной погрешностью* δ_{np} называют отношение абсолютной погрешности прибора к нормирующему значению X_H . Нормирующее значение условно может быть принятым равным верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы:

$$\delta_{np} = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100\%.$$

Погрешности любого средства измерения подразделяют на основную и дополнительные.

Основная – погрешность, проявляющаяся в нормальных условиях измерения.

Дополнительные погрешности возникают вследствие изменения за допустимые значения нормальных условий, например температуры или влажности окружающей среды, атмосферного давления, напряжения питания и т. п.

Требования к точности средств измерений обусловлены задачами, для решения которых осуществляются измерения. Для оценки точности работы средств измерений, предназначенных для различных целей, установлены так называемые классы точности измерительной аппаратуры.

Класс точности – обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерения, влияющих на точность. Для выпускаемых промышленных приборов класс точности устанавливают численно равным допускаемой основной приведенной погрешности, выраженной в процентах.

По значению допускаемой основной погрешности промышленные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Например, прибор класса точности 1,5 имеет максимально допускаемую основную приведенную погрешность $\pm 1,5 \%$.

В зависимости от причин возникновения, погрешности измерения подразделяются на систематические, случайные и грубые.

Под *систематическими* понимают погрешности, остающиеся постоянными или закономерно изменяющимися при повторных измерениях. Систематические погрешности возникают из-за неправильного монтажа средств измерения; влияния окружающей температуры на отдельные звенья (части) измерительной установки; несовершенства и дефектов изготовления их и по другим причинам. Для исключения систематических погрешностей в показания прибора могут быть введены поправки, имеющие вполне определенное значение и знак (плюс или минус), обратный знаку погрешностей.

Во многих случаях измерений систематические погрешности могут отсутствовать или иметь ничтожно малое значение.

Случайные погрешности при повторных измерениях одной и той же величины принимают различные взаимно несвязанные положительные или отрицательные значения. Случайные погрешности могут возникнуть, например, за счет трения в опорах, за счет неправильного режима работы электронных устройств и по многим другим причинам. Случайные погрешности нельзя, как систематические, исключать путем поправок, но при большом числе наблюдений можно уточнить их вероятные значения.

Считать случайные погрешности отсутствующими нельзя.

Используя закон распределения вероятностей этой величины, дадим характеристику частоты появления случайной величины (в данном случае это погрешность измерения).

В практике электрических измерений одним из наиболее распространенных законов распределения случайных погрешностей является нормальный закон (закон Гаусса) [9].

Математическое выражение нормального закона имеет вид

$$P(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2},$$

где $P(\delta)$ – плотность вероятности случайных погрешностей δ ;

σ – среднее квадратическое отклонение.

При $\delta = 0$

$$P(\delta) = 1/\sigma\sqrt{2\pi}.$$

Среднее квадратическое отклонение может быть выражено через случайные отклонения результатов наблюдений ρ :

$$\sigma \approx \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2} / (n-1),$$

где $\rho_1 = x_1 - x_{cp}$; $\rho_2 = x_2 - x_{cp}$; ...; $\rho_n = x_n - x_{cp}$.

Если известен закон распределения случайных погрешностей, то можно определить вероятность появления погрешности δ , не выходящей за некоторые заранее принятые границы. Этот интервал называют *доверительным*, а характеризующую его вероятность – *доверительной*. Доверительный интервал выбирают в зависимости от конкретных условий измерений.

Для оценки точности результата измерения можно использовать так называемую *вероятную погрешность*, относительно которой при повторных измерениях какой-либо величины имеются случайные погрешности, одна половина которых по абсолютной величине меньше вероятной погрешности, а другая больше ее. При нормальном законе распределения случайных погрешностей вероятная погрешность может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \sigma = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum \rho_i^2}{n-1}}.$$

Указанный способ определения доверительных интервалов справедлив только при большом количестве измерений ($n > 20 \dots 30$). Практически величину ε приходится определять по результатам меньшего числа измерений, используя при нормальном законе распределения коэффициенты Стьюдента t_n , которые зависят от задаваемой доверительной вероятности P и количества измерений n [9].

Для определения доверительного интервала среднюю квадратическую погрешность σ надо уменьшить на коэффициент Стьюдента. Окончательный результат измерения составит:

$$x = x_{cp} \pm t_n \sigma .$$

Грубые погрешности существенно превышают ожидаемую в данных условиях погрешность. Такие погрешности могут возникнуть из-за ошибок наблюдателя или неисправностей средств измерения. При констатации грубых погрешностей соответствующие измерения признаются недействительными.

Определение погрешностей средств измерений и установление их пригодности к применению называют *поверкой*. Поверку производят по официальным инструкциям и методическим указаниям Государственного комитета стандартов.

В процессе подготовки средств измерения к применению приходится производить их градуировку и юстировку.

Градуировкой называют операцию по определению градуировочной характеристики средств измерения. *Градуировочной характеристикой* называют зависимость между значениями величин на выходе и входе средств измерения. Такая характеристика составляется обычно в виде таблиц, графиков или формул и используется при выполнении отсчетного устройства средств измерения [23].

Юстировкой называют совокупность операций по доведению погрешностей средств измерений до значений, соответствующих техническим требованиям [23].

ГЛАВА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

2.1. Классификация измерительной аппаратуры и датчиков

Приборы и средства автоматизации – это большая группа устройств, с помощью которых осуществляется измерение, регулирование, управление и сигнализация технологических процессов различных производств.

Приборы и средства автоматизации подразделяют на измерительные и преобразующие приборы, регулирующие органы и исполнительные механизмы.

Измерительный прибор – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

По назначению измерительные приборы, используемые в системах контроля технологических процессов, делят на показывающие и регистрирующие.

Показывающие приборы указывают значение измеряемой величины в данный момент времени. Отсчет ведется по положению стрелки относительно шкалы прибора.

Регистрирующие приборы осуществляют регистрацию показаний. В свою очередь, регистрирующие приборы делят на самопишущие (показания записываются в форме диаграммы) и печатающие (показания печатаются в цифровой форме).

Самопишущие приборы производят автоматическую запись результатов измерения в течение всего времени работы прибора.

По наличию передачи показаний приборы могут быть с дистанционной передачей и без таковой.

По виду показаний измерительные приборы делят на *аналоговые* (непрерывные), в которых показания являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, и *цифровые* (дискретные), в которых автоматически вырабатываются дискретные (прерывистые) сигналы измерительной информации, а показания будут представлены в цифровой форме.

По измеряемым физико-химическим параметрам приборы выпускают для измерения температуры; давления и разрежения; расхода и количества; уровня; влажности и плотности газов; определения состава (анализа) газов и жидкостей.

По виду энергии носителя сигналов приборы делятся на три группы:

1) в группе *электрических* приборов сигнал преобразователя является электрическим, то есть с изменением величины измеряемого параметра

преобразователь меняет величину напряжения, тока, сопротивления, емкости, индуктивности и т. д.

2) в группе *пневматических* приборов используется энергия сжатого воздуха, с помощью которой осуществляется передача сигнала, приводится в действие вторичный прибор и исполнительный механизм.

3) в группе *гидравлических* приборов основным источником энергии является жидкость (чаще всего масло), находящаяся под давлением.

По способу построения измерительной схемы различают приборы прямого действия, сравнения, автоматической компенсации.

2.1.1. Первичный преобразователь. Основные характеристики датчика. Требования к датчикам

Средство измерения, вырабатывающее сигнал в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не позволяющее наблюдателю осуществить непосредственное восприятие, называют *измерительным преобразователем*.

Измерительные преобразователи являются составными частями приборов и измерительных систем. По месту, занимаемому в приборе, они бывают первичные, промежуточные и передающие.

Первичный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, к которому подводится измеряемая величина (среда); он установлен в измерительной цепи первым. Примерами первичных измерительных преобразователей могут служить: преобразователь термоэлектрический (термопара), сужающее устройство для измерения расхода. Первичные преобразователи часто называют *датчиками*.

Промежуточным измерительным преобразователем (или сокращенно промежуточным преобразователем) называется элемент измерительного устройства, занимающий в измерительной цепи место после первичного преобразователя. Основное назначение промежуточного преобразователя – преобразование выходного сигнала первичного преобразователя в форму, удобную для последующего преобразования в сигнал измерительной информации для дистанционной передачи. Примером промежуточного измерительного преобразователя может служить мембранный блок дифманометра – расходомера. В измерительной цепи измерения расхода он занимает место непосредственно после сужающего устройства и преобразует перепад давления на сужающем устройстве в соответствующее перемещение мембраны мембранного блока и связанной с ней механической системой прибора.

Передающим измерительным преобразователем (или сокращенно передающим преобразователем) называется элемент измерительного устройства, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации. Примером передающего преобразователя могут служить разные электрические или пневматические преобразователи, встраиваемые в дифманометры – расходомеры. С их помощью, например, перемещение мембраны, изменяющее положение сердечника дифференциального трансформатора дифманометра, преобразуется в выходной унифицированный сигнал постоянного тока $0...5$ мА (электрический преобразователь).

В последнее время в связи с применением в измерительной технике различных ЭВМ и микропроцессоров получают распространение аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Первые – служат для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, изменяющиеся дискретно во времени с постоянным шагом; вторые – для преобразования дискретных по времени сигналов в аналоговые. В теплотехнических измерениях чаще всего применяют АЦП.

Чувствительный элемент – элемент измерительного преобразователя, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой или регулируемой величины. В промышленных условиях в качестве чувствительных элементов применяют плоские и гофрированные упругие мембраны, гармониковые мембраны (сильфоны), трубчатые пружины, поплавки, биметаллические пластины и другое.

Условно измерительный прибор конструктивно можно разделить на три самостоятельных узла: *датчик, измерительное устройство и указатель* (или регистратор), которые могут размещаться отдельно друг от друга и соединяться между собой кабелем или другой линией связи, которым передаются результаты измерений от преобразователя ко вторичному прибору (рис. 2.1).

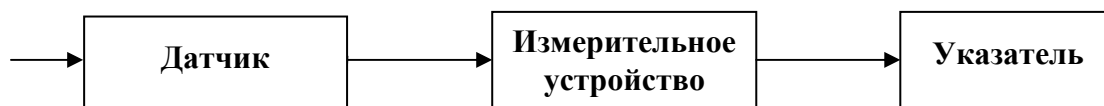


Рис. 2.1. Простейшая функциональная схема измерительного прибора

Главным элементом измерительного прибора является первичный измерительный преобразователь или датчик. В САК датчик называют первичным прибором. Он соединяется линией связи со вторичным прибором,

объединяющим измерительное устройство и указатель. Вторичные приборы применяют для передачи, обработки, хранения информации. Один и тот же вторичный прибор может использоваться для контроля нескольких параметров.

Датчики являются одним из основных функциональных элементов всякой системы контроля. Их свойства и характеристики часто во многом определяют работу САК в целом.

По принципу действия датчики, применяемые в электрических САК, можно разделить на две группы: параметрические и генераторные.

В *параметрических датчиках* (термосопротивлениях, тензосопротивлениях, фотосопротивлениях, емкостных, датчиках) контролируемая величина преобразуется в параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, емкость, взаимную индуктивность. Для обнаружения изменения параметра цепи под действием контролируемой величины необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

В *генераторных датчиках* различные виды энергии непосредственно преобразуются в электрическую энергию. К генераторным датчикам относятся термоэлектрические датчики (термопары), индукционные, основанные на явлении электромагнитной индукции, пьезоэлектрические, фотоэлектрические и т. п.

По виду выходной величины датчики, применяемые в САК, можно разделить на группы, в которых контролируемый параметр преобразуется в следующие величины:

- 1) омическое сопротивление;
- 2) емкость;
- 3) индуктивность;
- 4) величину постоянного тока (напряжения);
- 5) амплитуду переменного тока (напряжения) и т. д.

Такая классификация позволяет выбрать наиболее пригодные измерительные устройства.

По виду входных величин датчики, используемые в системах ТГВ, разделяют на следующие основные группы:

- 1) температуры и потоков теплоты;
- 2) влажности и энтальпии влажного воздуха;
- 3) уровня;
- 4) давления;
- 5) расхода;
- 6) для анализа состава вещества.

Обобщенные характеристики датчиков принято разделять на статические, динамические и эксплуатационные.

Основным показателем датчика, характеризующим его статическую точность, является *чувствительность*, под которой понимают отношение изменения выходной величины Y , или его приращения ΔY к соответствующему изменению входной величины X , или ΔX :

$$S = \frac{Y}{X} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}.$$

Порог чувствительности или *разрешающая способность* – наименьшее изменение входной величины ΔX , способное вызывать реакцию датчика. Важную роль играет мощность входного и выходного сигналов.

Чувствительность датчика зависит от вида его статической характеристики, которой является аналитически или графически выраженная зависимость выходной величины от входной. Желательно, чтобы характеристика была линейной, непрерывной и не имела гистерезиса (с однозначным выходным сигналом). У датчиков с линейной характеристикой чувствительность постоянна во всем диапазоне измерений, что дает возможность делать шкалу прибора равномерной.

Большое значение имеет динамическая характеристика датчика – зависимость выходного от входного сигнала во времени, особенно при изменениях в нестационарных условиях. Важнейшей динамической характеристикой является *инерционность датчика*. Об инерционности датчика судят по динамической постоянной T_z и времени запаздывания τ .

По динамическим свойствам датчики теплотехнических процессов относят к апериодическим и колебательным звеньям первого и более высоких порядков.

При выборе датчиков необходимо учитывать, что во время эксплуатации они находятся в особо тяжелых условиях. Размещают их непосредственно на объекте контроля, при резко изменяющихся температурах, давлениях, вибрациях, агрессивном действии контролируемых сред. В связи с этим требуется тщательный выбор принципов построения, конструктивных элементов и материалов с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности.

Важнейшими эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к датчикам являются необходимость несложной, надежной, недорогой и удобной конструкции; взаимозаменяемости; надежного контакта с объектом или средой и отсутствия обратного влияния датчика на объект.

Нормальными условиями эксплуатации принято считать:

- температуру внешней среды – 20 ± 5 °С,
- атмосферное давление – 760 ± 20 мм.рт.ст.,
- влажность – 60 ± 20 %,
- отсутствие вибрации, электрических и магнитных полей.

2.2. Государственная система промышленных приборов. Стандартизация и унификация средств автоматизации

Большим достижением в области развития приборостроения явилось создание единой Государственной системы приборов и средств автоматизации (ГСП).

Государственная система приборов и средств автоматизации представляет собой сочетание максимально унифицированных блоков, приборов, элементов и устройств с широким диапазоном возможностей – от осуществления автоматического контроля и регулирования отдельных процессов до решения задач комплексной автоматизации, предусматривающих использование новейших средств вычислительной техники. В соответствии с разработанными принципами, ГСП предусматривает единую классификацию средств контроля и управления; унификацию входных и выходных сигналов, параметров питающих устройств; введение единого ряда требований к точности технических средств, надежности, условиям эксплуатации, а также введение единого ряда габаритных и присоединительных размеров.

Введение ГСП вызвано экономическими, техническими и эксплуатационными соображениями. Переход от огромного числа (более 10000 типов) индивидуальных приборов, каждый из которых имел свои специфические особенности, позволил унифицировать приборы и организовать их массовое производство.

Унификация приборов по техническим характеристикам позволила реализовать блочно-модульный принцип построения систем автоматизации технологических процессов, существенно упрощающий их проектирование, монтаж и наладку, снижающий эксплуатационные затраты. Основу блочно-модульного построения систем автоматизации составляет *принцип унификации выходных сигналов*. Применение принципа унификации выходных сигналов обеспечивает взаимозаменяемость, типизацию конструктивных решений и гибкость комплектации систем автоматизации.

Сигналы – носители информации в средствах автоматизации могут различаться как по физической природе и параметрам, так и по форме представления информации.

По виду носителей информации приборы ГСП можно разделить на две группы:

1. *Энергетическую*. В рамках энергетической группы (энергии) носителя сигналов приборы ГСП делятся на ветви:

- электрическую: токовую (выходной сигнал – постоянный ток 0...5 и 0...20 мА), частотную (выходной сигнал – частота 1500...2500 Гц);
- пневматическую (выходной сигнал – давление сжатого воздуха 20...100 кПа). Развитие пневматической ветви ограничивается относительно низкой скоростью преобразования и передачи пневматических сигналов;
- гидравлическую. Меньшее развитие получила гидравлическая ветвь средств ГСП; гидравлические средства применяются главным образом в котельных установках.

Наиболее распространенной является электрическая ветвь приборов ГСП.

2. *Вещественную*. Вещественный вид носителей информации реализуется с дисков, бланков и т. д.

Классификация приборов связана с иерархической структурой изделий ГСП. Классификационная схема представлена в виде четырехуровневой системы (рис. 2.2), отображающей контур управления – от средств получения информации о технологическом процессе до средств воздействия на процесс.

Приборы нижнего уровня, средства получения информации о процессе (датчики) и воздействия на процесс (управляющие органы) непосредственно взаимодействуют с технологическим процессом.

На втором уровне размещаются средства автономного контроля и регулирования. В ряде случаев датчики и управляющие органы не отделены от средств автономного контроля и регулирования, поэтому технологический объект управления (ТОУ) может быть связан непосредственно со вторым уровнем.

Третий уровень приборов ГСП включает в себя средства централизованного контроля и управления. Эти средства составляют основу автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

На четвертом уровне размещаются средства автоматизации управления, входящие в состав автоматизированных систем управления (АСУ) и предназначенные для управления организационно-экономическими процессами.

По функциональному признаку приборы ГСП делятся на четыре группы.

К первой группе относятся устройства, обеспечивающие получение информации о состоянии технологического объекта управления. Это датчики, нормирующие устройства, формирующие унифицированный сигнал, анализаторы, реагирующие на определенные значения измеряемых параметров и выдающие дискретные сигналы, устройства формирования и передачи по каналам связи алфавитно-цифровой информации.

Во вторую группу входят приборы, обеспечивающие преобразование информации о состоянии ТООУ – преобразователи сигналов и кодов, коммутаторы измерительных цепей, устройства телеизмерения и телесигнализации.

Третья группа содержит приборы, осуществляющие хранение и обработку информации с формированием управляющих воздействий. Приборы этой группы – функциональные и операционные преобразователи, анализаторы сигналов, запоминающие устройства, задатчики, регуляторы, микропроцессоры и управляющие вычислительные системы.

В четвертую группу входят устройства выдачи управляющей информации, обеспечивающие исполнение команд, – электрические, гидравлические и комбинированные исполнительные механизмы.



Рис. 2.2. Структура изделий ГСП: 1 – 4 уровни

2.2.1. Вторичные приборы систем автоматического контроля

Вторичные приборы в соответствии с примененным в них методом измерения разделяются на приборы прямого преобразования и приборы уравнивания.

Измерительные приборы прямого преобразования отличаются простотой конструкции (следовательно, большей надежностью); меньшими массой, габаритами и стоимостью; имеют высокое быстродействие, благодаря чему широко применяются при измерениях. Однако эффективность «извлечения» информации из потока энергии, получаемого от контролируемого объекта измерения, в этих приборах достаточно мала, чем объясняется их относительно низкая точность.

По методу прямого преобразования построен прибор для измерения температуры с помощью термопары и милливольтметра (рис. 2.3).

В замкнутом контуре, состоящем из термопары T и рамки милливольтметра mV , измеряется ток, величина которого определяет угол поворота подвижной системы прибора. Поэтому изменение электрических характеристик цепи, вызванное, например, изменениями внешних условий, приводит к значительным погрешностям.

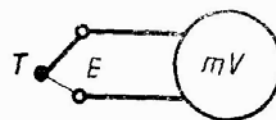


Рис. 2.3. Схема измерения температуры с помощью термопары и милливольтметра

Приборы прямого преобразования могут содержать и более сложные измерительные цепи, например, в виде делителей (тока или напряжения), неравновесных мостов.

В приборах уравнивающего преобразования значительно эффективнее используется энергия, получаемая от объекта измерения, что обеспечивает большую точность и более широкий рабочий диапазон, однако значительно уменьшается быстродействие и усложняется конструкция, а, следовательно, увеличиваются масса, объем, стоимость и снижается надежность приборов. Тем не менее, эти приборы все шире используются на практике, так как обеспечивают показатели качества измерения, недостижимые для приборов прямого преобразования.

В системах ТГВ широко применяются приборы уравнивания с мостовыми равновесными и компенсационными измерительными схемами.

В качестве вторичного прибора используется мост с автоматическим процессом уравнивания – *автоматический мост* (рис. 2.4). Плечи моста ab , $бв$, $аг$ и $гв$ содержат соответственно сопротивления $r_x + r'$; $r_1 + r''$; r_2 ; r_3 . Величина r_x представляет собой сопротивление датчика того параметра, для измерения которого предназначен мост

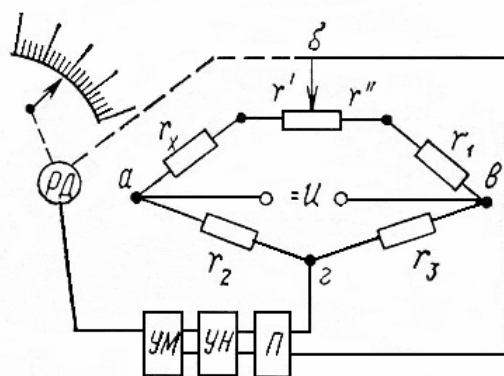


Рис. 2.4. Принципиальная схема автоматического моста

(например, термосопротивление при измерении температуры), а величины r' , r'' – части регулируемого реохорда, ползунок которого связан через передачу с ротором реверсивного двигателя $РД$. На диагональ моста ab подается напряжение от источника напряжения постоянного тока. Питание может осуществляться и от источника переменного тока; в этом случае отпадает необходимость во включении преобразователя $П$.

Если мост уравновешен, то потенциалы точек b и z равны, то есть $U_{bz} = \varphi_b - \varphi_z = 0$, напряжение в измерительную схему не поступает и ротор двигателя неподвижен.

Условие равновесия моста может быть записано следующим образом:

$$R_{ab} R_{z\delta} = R_{b\delta} R_{az}$$

то есть

$$(r_x + r') r_3 = (r_1 + r'') r_2$$

При изменении контролируемого параметра изменяется сопротивление датчика r_x , мост выходит из состояния равновесия и на диагонали bz появляется напряжение, величина и направление которого зависят от значения r_x . Это напряжение преобразуется в напряжение переменного тока преобразователем $П$, усиливается с помощью усилителей переменного тока ($УН$ – усилитель напряжения, $УМ$ – усилитель мощности) и подается на реверсивный двигатель $РД$. При вращении ротор двигателя передвигает ползунок реохорда в сторону достижения равновесия моста и одновременно поворачивает указатель, а при записи измеряемой величины перемещает перо, записывающее на диаграмме ее значение. Ротор двигателя будет вращаться до достижения равновесия моста.

Погрешность прибора зависит от погрешности уравнивающего преобразования и от погрешности указателя. Точность прибора повышается при увеличении чувствительности усилителя и его коэффициента усиления. Погрешность автоматических мостов не превышает $\pm 0,5 \%$, а в некоторых случаях и $\pm 0,2 \%$ предела измерения. В системах ТГВ автоматические мосты применяются для измерения температуры, давления, расхода

вещества, уровня жидкости, влажности и многих других неэлектрических величин, изменение которых может быть преобразовано в изменение электрического сопротивления соответствующих датчиков.

В качестве вторичных приборов широко применяются также автоматические потенциометры, в которых используется компенсационная схема измерения. Автоматические потенциометры применяют для измерения электрических и неэлектрических величин, которые могут быть предварительно преобразованы в напряжение или эдс постоянного тока.

Контролируемая величина x с помощью первичного преобразователя $ПП$ преобразуется в эдс E_x , поступающую на вход автоматического потенциометра (например, термоэдс термопары при контроле температуры) (рис. 2.5). Величина эдс E_x сравнивается с напряжением U_y , разность между ними $\pm \Delta U$ подается на вход усилителя $Ус$, а затем на вход двигателя $Д$.

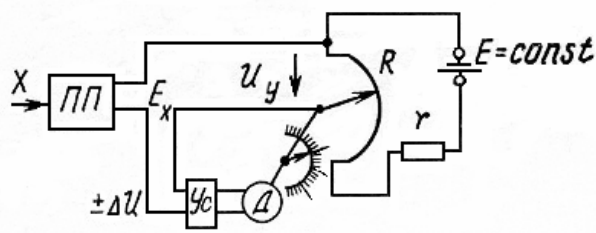


Рис. 2.5. Схема автоматического потенциометра

Уравновешивающее напряжение U_y снимается с выхода цепи обратного преобразования, образованного источником стабильного напряжения E и реохордом R . Входной величиной цепи обратного преобразования является угол поворота вала двигателя $Д$, отсчитываемый по указателю прибора. Цепь прямого уравнивания составляют усилитель $Ус$ и двигатель $Д$.

При равенстве эдс E_y и уравнивающего напряжения U_y ротор двигателя неподвижен и отсчетное устройство, проградуированное в значениях измеряемого параметра, показывает его мгновенное значение. При изменении сигнала на входе нарушается компенсация; на вход усилителя $Ус$ подается $\Delta U = E_x - U_y$ (величина и направление, которого определяются значением контролируемого параметра). После усиления напряжение сигнала поступает на двигатель, который перемещает подвижной контакт реохорда до наступления момента компенсации, соответствующего новому значению контролируемого параметра.

Основными источниками погрешностей в рассматриваемых приборах являются случайная погрешность от неполного уравнивания вследствие некоторого порога трогания двигателя, погрешность реохорда, и погрешность от нестабильности источника напряжения E .

Приборостроительной промышленностью выпускаются автоматические потенциометры, работающие в комплекте с датчиками постоянного напряжения $0...1$ и $0...10$ В (модификации КПУ, КВУ, КСУ) и датчиками постоянного тока $0...5$ и $0...20$ мА, а также с одной или несколькими термомпарами стандартной градуировки (модификации КПП, КВП, КСП).

В качестве вторичных приборов в системах ТГВ нашли широкое применение *автоматические дифференциально-трансформаторные приборы* (рис. 2.6).

Эти приборы работают с датчиком, имеющим специальный дифференциальный трансформатор $ДТ1$ с подвижным сердечником, выполненным из мягкой стали. Сердечник связан с чувствительным элементом первичного прибора. Во вторичном приборе имеется аналогичный трансформатор $ДТ2$, сердечник которого перемещается профилированным кулачком $К$. Вторичные обмотки трансформаторов, каждая из которых состоит из двух включенных встречно секций, то есть $\Delta e = e_1 - e_2$, выполнены по компенсационной схеме. По первичным обмоткам $ДТ1$ и $ДТ2$ протекает одинаковый ток, так как они включены последовательно и питаются переменным напряжением. При одинаковом положении сердечников катушек во вторичных катушках индуцируются равные друг другу эдс ($\Delta e_1 = \Delta e_2$), а вследствие встречного включения вторичных обмоток эти эдс компенсируются, и на вход электрического усилителя ЭУ сигнал не поступает.

При рассогласованном положении сердечников, что вызывается перемещением сердечника катушки датчика при изменении контролируемого параметра, нарушается равенство ($\Delta e_1 \neq \Delta e_2$), на вход усилителя подается напряжение, равное их разности. Величина и фаза этого напряжения зависят от величины и направления рассогласования. Это переменное напряжение,

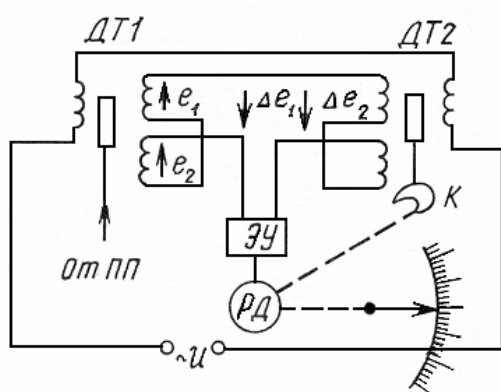


Рис. 2.6. Схема автоматического дифференциально-трансформаторного прибора

усиленное электронным усилителем, приводит во вращение фазочувствительный двигатель, который с помощью кулачка перемещает плунжер в катушке прибора до получения равенства напряжений, индуцируемых во вторичных обмотках обеих катушек. Одновременно двигатель перемещает отсчетное устройство прибора. Двигатель останавливается при достижении согласования положений плунжеров $ДТ1$ и $ДТ2$.

Автоматические дифференциально-трансформаторные приборы применяются для измерения неэлектрических величин: давления, расхода, уровня, напора и т. п. (модификации КПД, КВД, КСД).

По устройству и назначению вторичные приборы делятся на две группы:

- 1) показывающие, дающие информацию о мгновенном значении измеряемого параметра;
- 2) показывающие и самопишущие, осуществляющие мгновенное измерение и фиксирующие величину измеряемого параметра на диаграммной бумаге.

Электрическая ветвь ГСП оснащена комплексом вторичных приборов КС, который содержит шесть групп приборов: две группы – показывающие и четыре – самопишущие. К первой группе КП-1 относятся стрелочные показывающие приборы, в которых показания отсчитываются с помощью указателя, перемещающегося относительно шкалы. Шкала расположена по окружности, угол охвата составляет 315° . Приборы второй группы КВ-1 имеют вращающуюся шкалу, нанесенную на цилиндрическую поверхность. Третью, четвертую и пятую группы составляют самопишущие приборы, фиксирующие результат измерений на диаграммной ленте. Запись осуществляется на ленте шириной 100 мм (КС-1 – миниатюрное исполнение), 160 мм (КС-2 – малогабаритное исполнение) и 250 мм (КС-4) в прямоугольных координатах. Скорость движения диаграммной ленты может изменяться от 20 до 720 мм/ч. К шестой группе относятся самопишущие приборы, в которых запись ведется в полярных координатах на дисковой диаграмме. Частота вращения диаграммного диска постоянна – 1 об/сут. Угол поворота пропорционален времени измерения.

Приборы каждой группы выпускаются в четырех модификациях, имеющих соответствующие измерительные схемы. Приборы КВ-1, КС-2 и КС-4 могут выпускаться многоточечными, при этом они контролируют 3, 6, 12 однотипных датчиков, а на диаграмме отметки о величине измеряемого параметра печатаются циклично точками, рядом с которыми цифрами указываются номера датчиков.

В настоящее время разработан комплекс узкопрофильных вторичных показывающих приборов АСК. Они занимают на щитах в 5...10 раз меньшую площадь, чем приборы комплекса КС, и имеют световые указатели – светофильтры, позволяющие выделить зону допустимого изменения технологического показателя.

Приборы АСК легко группируются в блоки, а также выпускаются многоканальными (на 3, 4, 8, 12 измерительных каналов). Многоканальные приборы состоят из модулей, каждый из которых имеет четыре самостоятельные измерительные схемы с общей оптической системой.

Все выпускаемые промышленностью вторичные приборы при необходимости могут быть укомплектованы дополнительным набором специальных устройств. В комплекте с приборами могут поставляться двух- и трехпозиционные сигнальные устройства, которые используются в системах позиционного регулирования; преобразователи сигналов ГСП постоянного и переменного тока, частотные и пневматические.

В зависимости от сигнала первичного прибора выбирается тип измерительной схемы, а в зависимости от информационной функции прибора и требуемой точности контроля принимается конструктивное решение вторичного прибора. Шкала прибора определяется по каталогу таким образом, чтобы верхний предел измерений приблизительно соответствовал двум третям шкалы, после чего устанавливается набор необходимых дополнительных устройств [9].

2.3. Определение погрешностей прибора

Цель: приобретение навыков в определении погрешностей прибора. Знакомство с каталогами, справочниками приборов и средств автоматизации. Выбор прибора по справочникам и каталогам.

2.3.1. Теория и методы расчета

По классу точности прибора можно определить его допустимые погрешности Δ_{II} и γ_{II} .

Для прибора с нулевой отметкой шкалы абсолютная основная погрешность равна:

$$\Delta_{II} = \pm \frac{K \cdot X_N}{100}, \quad (2.1)$$

где K – класс точности прибора;

X_N – нормирующее значение, равное верхнему пределу показаний прибора.

Приведенная основная погрешность прибора вычисляется по формуле

$$\gamma_{II} = \pm K.$$

Для приборов, имеющих шкалу с подавлением нуля, дополнительно учитывается погрешность показаний на начальной отметке шкалы. Для этих приборов абсолютная основная погрешность равна:

$$\Delta_{\Pi} = \pm \left(\frac{KE}{100} + \frac{dD}{100} \right), \quad (2.2)$$

где E – диапазон шкалы прибора;

D – диапазон подавления (нижний предел измерения прибора);

d – значение поправки на подавление нуля (для приборов класса 0,5 $d = \pm 0,10$; для классов 0,5 и 1,0 $d = \pm 0,15$; для класса 1,5 $d = \pm 0,25$).

Приведенная основная погрешность приборов с подавлением нуля определяется формулой:

$$\gamma_{\Pi} = \pm \left(K + \frac{dD}{E} \right) \quad (2.3)$$

$$\gamma_{\Pi} = \pm \frac{100\Delta_{\Pi}}{E}.$$

Пример 1. Определить основную погрешность измерения манометром класса 2,5, имеющего шкалу $0 \dots 200 \text{ кгс/см}^2$.

По формуле (2.1) находим, что абсолютная основная погрешность манометра по всей шкале не должна превышать значения:

$$\Delta_{\Pi} = \pm \frac{KX_N}{100} = \frac{\pm 2,5 \cdot 200}{100} = \pm 5 \text{ кгс/см}^2.$$

Приведенная погрешность $\gamma_{\Pi} = \pm K = \pm 2,5\%$.

Пример 2. Определить основную погрешность прибора класса точности 1,5 для измерения температуры, имеющего шкалу $600 \dots 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

По формуле (2.2) находим абсолютную основную погрешность прибора

$$\Delta_{\Pi} = \pm \left[\frac{1,5(1100 - 600)}{100} + \frac{0,25 \cdot 600}{100} \right] = \pm (7,5 + 1,5) = \pm 9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

По формуле (2.3) находим приведенную основную погрешность

$$\gamma_{\Pi} = \pm \left(1,5 + \frac{0,25 \cdot 600}{500} \right) = \pm (1,5 + 0,3) = \pm 1,8 \text{ } \%$$

Пример 3. Определить пригодность к эксплуатации прибора класса 1,5 для измерения температуры со шкалой $200 \dots 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, если при стендо-

вой поверке найдена его максимальная абсолютная погрешность $\Delta = -10^{\circ}\text{C}$.

По формуле (2.2) находим допустимую абсолютную основную погрешность прибора

$$\Delta_{\text{II}} = \pm \left(\frac{1,5 \cdot 400}{100} + \frac{0,25 \cdot 200}{100} \right) = \pm 6,5^{\circ}\text{C}.$$

Так как действительная максимальная абсолютная основная погрешность прибора превышает ее допустимое значение по классу точности, прибор не пригоден к эксплуатации.

2.3.2. Выбор прибора по справочникам и каталогам

Используя литературу [1], [14] выбрать типы манометров классов точности: 1; 1,5.

Варианты задач для самопроверки

Вариант 1. Определите относительную погрешность измерения в начале шкалы (для 30 делений) для прибора класса точности 0,5, имеющего шкалу 100 делений. Насколько эта погрешность больше погрешности на последнем сотом делении?

Вариант 2. Какого класса точности нужно взять измерительный прибор, чтобы в середине шкалы его погрешность измерения не превышала 1 %?

Вариант 3. Основная приведенная погрешность амперметра, рассчитанного на ток 10 А, составляет 2,5 %. Определите абсолютную погрешность для первой отметки шкалы (1 А)?

Вариант 4. При определении класса точности ваттметра рассчитанного на 750 Вт, получили следующие данные: 47 Вт – при мощности 50 Вт; 115 Вт – при 100 Вт; 204 Вт – при 200 Вт; 413 Вт – при 400 Вт; 728 Вт – при 750 Вт. Каков класс точности прибора?

Вариант 5. Какую наибольшую (предельную) абсолютную погрешность можно ожидать при измерении давления порядка 40 кгс/см^2 , если использовать для этих целей манометр класса точности 1,5 со шкалой 0...160 кгс/см^2 .

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ТГВ

3.1. Контактный метод измерения температуры

В технике автоматизации систем ТГВ одним из наиболее распространенных контролируемых параметров является температура жидкостей и газов.

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. В автоматических системах измерение температуры основано на измерении физических свойств тел, функционально связанных с температурой.

Приборы, служащие для измерения температуры, путем преобразования ее в показание или сигнал, являющийся известной функцией температуры, называют *термометром*.

Чувствительным элементом называют часть термометра, преобразующую тепловую энергию в другой вид энергии для получения информации о температуре.

Для измерения температур применяют различные приборы, основанные на известных физических процессах. Эти приборы классифицируют в зависимости от того, какой метод измерения положен в основу их конструкции. Существуют следующие методы измерения: *контактный* (метод непосредственного соприкосновения измерительного прибора с измеряемой средой) и *неконтактный* (метод, основанный на расположении измерительного прибора, на расстоянии от измеряемой среды).

К приборам, основанным на **контактном** методе измерений, относят:

- *жидкостные термометры*, действие которых основано на использовании теплового расширения жидкости;
- *манометрические термометры*, действие которых основано на использовании зависимости давления вещества при постоянном объеме от температуры;
- *термоэлектрические термометры*, действие которых основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы термопары (чувствительного элемента термоэлектрического термометра) от температуры;
- *термометры сопротивления*, действие которых основано на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры.

К приборам, основанным на *неконтактном* методе измерений, относят пирометры излучения. Это термометры, действие которых основано на использовании теплового излучения нагретых тел.

3.1.1. Жидкостные термометры расширения

Жидкостные термометры расширения используют в основном как показывающие приборы местного действия в интервале температур от минус 190 до + 750 °С.

По назначению термометры подразделяют на технические, лабораторные и образцовые.

Жидкостные стеклянные термометры (рис. 3.1) состоят из двух основных частей: резервуара с термометрической жидкостью 1 и соединенной с ним капиллярной трубки 2 (капилляра). Сзади капилляра расположена пластинка 3 из молочного стекла, на которой нанесены деления шкалы.

Термометрическая жидкость заполняет резервуар и часть капилляра, представляющего собой тонкую стеклянную трубку. При измерении температур объем жидкости изменяется, вследствие чего столбик жидкости в капилляре поднимается или опускается пропорционально изменению температуры. Положение верхней части (мениска) столбика жидкости определяет измеряемую температуру.

Для технических стеклянных термометров в качестве термометрической жидкости используют ртуть в диапазоне измерений от минус 30 до + 600 °С; спирт, толуол – от минус 130 до + 60 °С и другие органические жидкости.

В зависимости от формы нижней части эти термометры подразделяются на прямые (тип А) и угловые (тип Б) с углом 90° или 135°.

В промышленных условиях для предохранения от механических повреждений стеклянные термометры с ртутным заполнением помещают в защитную металлическую оправу, снабженную для крепления штуцером с резьбой (рис. 3.2).

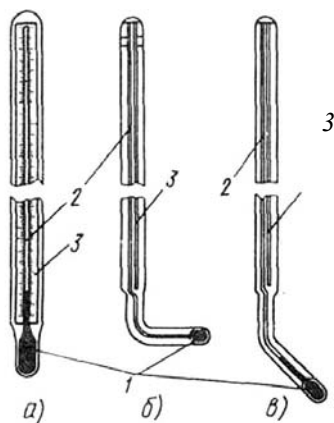


Рис. 3.1. Жидкостные стеклянные термометры:
а) прямой; б) угловой 90°; в) угловой 135°; 1 – резервуар, 2 – капиллярная трубка, 3 – пластинка

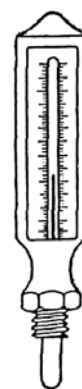


Рис. 3.2. Промышленный жидкостный стеклянный термометр

Основные достоинства этих термометров – простота, надежность, высокая точность измерения. Недостатки – невозможность ремонта, отсутствие автоматической записи и передачи показаний на расстояние.

3.1.2. Термометры расширения твердых тел (биметаллические и dilatометрические)

Принцип действия биметаллических и dilatометрических термометров основаны на различии коэффициентов теплового расширения твердых тел, из которых выполнены чувствительные элементы. Биметаллический термометр представляет собой пластину, сваренную из двух металлов с различными температурными коэффициентами расширения. Наиболее часто употребляемая пара сталь-инвар. На рис. 3.3, а показана принципиальная схема чувствительного элемента, состоящего из консольно укрепленной пластины. При $\alpha_1 > \alpha_2$ (α – температурный коэффициент линейного расширения), незакрепленный конец пластинки перемещается при изменении температуры окружающей среды T . Перемещение конца пластинки через рычажную систему передач приводит в движение показывающую стрелку прибора. Показания биметаллического термометра могут регистрироваться на диаграммной ленте. Для увеличения чувствительности иногда биметаллические термометры выполняют в виде спирали (рис. 3.3, б).

Dilatометрический термометр состоит из инварного стержня, латунной трубки и показывающей стрелки (рис. 3.4). Один конец инварного стержня жестко соединен с дном латунной трубки, а другой свободно перемещается. В зависимости от температуры окружающей среды возникает разность удлинений трубки и стержня. При этом свободный конец стержня отклоняет стрелку прибора.

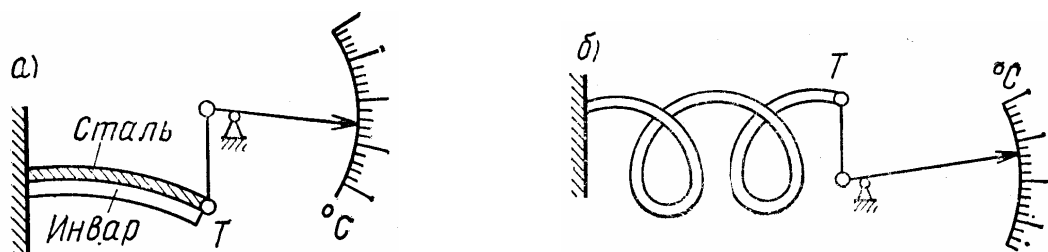


Рис. 3.3. Схема биметаллического термометра:
а) в виде пластины, б) в виде спирали

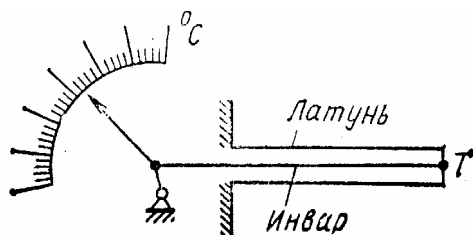


Рис. 3.4. Схема дилатометрического термометра

Дилатометрические и биметаллические термометры применяются при измерении температур в диапазоне от 0 до 500 °С, а некоторые и до 1000 °С (например дилатометры инвар-латунь Л62). Эти термометры просты по конструкции и надёжны в работе. Однако они обладают недостаточной точностью вследствие влияния остаточных деформаций и

значительной инерционностью. Применяются в системах автоматического регулирования, например СКВ, где необходимы конструктивно несложные датчики температуры, не требующие специальных усилителей-преобразователей.

3.1.3. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении объема или давления среды в замкнутой системе в зависимости от температуры чувствительного элемента. В зависимости от вида среды, находящейся в замкнутой системе, манометрические термометры разделяются на:

- жидкостные (рабочее вещество – ртуть, кремнийорганическая или полиметилсилоксановая жидкость),
- газовые (наполнитель – азот или аргон),
- конденсационные (паровые), в которых используются низкокипящие жидкости – фреон, ацетон, этиловый спирт.

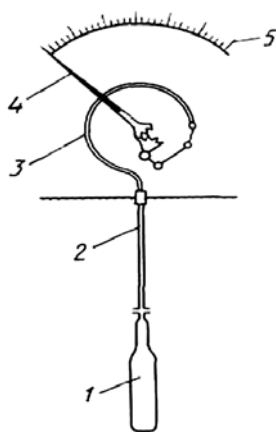


Рис. 3.5. Схема манометрического термометра: 1 – термобаллон; 2 – капиллярная трубка; 3 – трубчатая пружина; 4 – стрелка; 5 – шкала

Чувствительным элементом у них служит трубчатая (манометрическая) пружина, упругая деформация которой зависит от изменения объема (в жидкостных термометрах) или давления (в парожидкостных и газовых термометрах) рабочей среды в замкнутой системе под действием температуры. Рассмотрим принцип действия этих манометров на примере жидкостного манометра.

В жидкостном термометре (рис. 3.5) термобаллон 1 цилиндрической формы, металлическая капиллярная трубка 2 и трубчатая ма-

нометрическая пружина 3 образуют замкнутую систему. В измеряемую среду помещают термобаллон, полностью заполненный термометрической жидкостью. При повышении температуры измеряемой среды в термобаллоне образуется избыточный объем жидкости, который поступает в манометрическую пружину. Увеличение объема в замкнутой системе приводит к росту давления, от чего манометрическая пружина стремится выпрямиться, ее свободный конец перемещается и через систему рычагов и зубчатых колес изменяет положение стрелки 4 на шкале 5. По положению стрелки судят об измеряемой температуре.

В парожидкостных термометрах термобаллон частично заполнен термометрической жидкостью с низкой температурой кипения (ацетон, метилхлорид). Остальная часть системы заполнена насыщенными парами этой жидкости. Давление насыщенного пара изменяется в зависимости от температуры и передается на трубчатую пружину по капилляру посредством сконденсировавшейся жидкости. Давление насыщенных паров изменяется непропорционально температуре, поэтому у парожидкостных термометров шкала неравномерная.

В газовых термометрах вся система заполнена инертным газом (азотом, гелием). Изменение температуры вызывает в таком термометре изменение давления инертного газа при постоянном его объеме в замкнутой системе (термобаллон – капилляр – трубчатая пружина). Чем выше температура, тем большим будет давление газа в системе; вследствие чего трубчатая пружина, стремясь выпрямиться, будет поворачивать через систему рычагов стрелку по шкале.

Манометрические термометры выпускаются для измерения температуры в диапазоне от минус 200 до + 600 °С. Основным достоинством манометрических термометров является простота конструкции и обслуживания, малая инерционность. Большинство манометрических термометров обладает хорошей вибростойкостью. Точность измерения манометрических термометров зависит от колебаний температуры среды, окружающей соединительный капилляр. К недостаткам следует отнести невысокую точность измерений (класс большинства приборов – 1; 1,5; 2,5) и большие размеры чувствительных элементов.

3.1.4. Термоэлектрические термометры

Для измерения высоких температур с дистанционной передачей показаний применяются термоэлектрические термометры, работа которых основана на принципе термоэлектрического эффекта.

Два проводника 1 и 2 из разных материалов (рис. 3.6) сварены в точках *а* и *б*.

В разнородных материалах количество свободных электронов различно, поэтому в точках *a* и *b* происходит диффузия электронов из одного проводника в другой. Допустим, что проводник 2 имеет свободных электронов больше, чем проводник 1, тогда потенциал проводника 1 будет выше, чем проводника 2. Количество диффундирующих электронов, а, следовательно, и потенциал спая зависят от температуры, до которой нагрет спай. Если температура точки *a* выше температуры точки *b*, то ток потечет через точку *a* от проводника 1 к проводнику 2, а через точку *b* – от проводника 2 к проводнику 1. Общая электродвижущая сила, развиваемая в цепи, будет равна разности потенциалов спая *a* и *b*:

$$E = \varphi_a - \varphi_b \quad (3.1)$$

Термоэлектродвижущей силой (термоэдс) называется электродвижущая сила, появляющаяся в нагретых до разных температур спаях двух электродов из разнородных материалов. Проводники, из которых собирается термоэлектрический термометр, называются *термоэлектродами*.

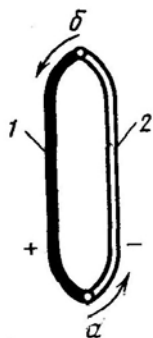


Рис. 3.6. Схема, поясняющая действие термоэлектрического термометра: *a* – рабочий конец (точка нагрева), *b* – свободный конец; 1 – положительный проводник (термоэлектрод), 2 – отрицательный проводник (термоэлектрод)

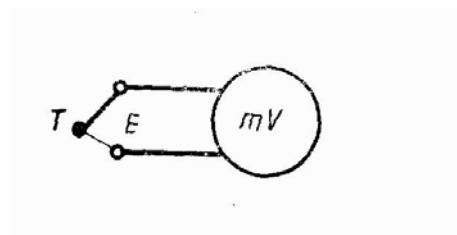


Рис. 3.7. Схема измерения температуры с помощью термопары и милливольтметра

Нагреваемый конец термоэлектрического термометра называется *рабочим*, а холодный конец – *свободным*. Если свободный конец термоэлектрического термометра не сваривать, а замкнуть на прибор, который может измерять напряжение, например милливольтметр, то прибор покажет величину, пропорциональную термоэдс (рис. 3.7).

В соответствии с формулой (3.1) термоэдс будет тем больше, чем больше разница температур рабочего и свободного конца термоэлектрического термометра. Поэтому свободный конец термоэлектрического термометра стараются вынести как можно дальше от зоны с повышенной температурой.

При измерении температуры с помощью термопар необходимо учитывать температуру свободных концов термопары.

Компенсация влияния температуры свободных концов производится либо автоматически во вторичных приборах, либо используется компенсационная коробка.

Так как контакты соединительных проводов с электродами термоэлектрического термометра, находящиеся в зоне повышенной температуры, тоже могут создавать термоэдс, то в качестве проводов применяют специальные компенсационные провода. Материалы компенсационных проводов и электродов термоэлектрического термометра подбирают с близкими электрическими свойствами так, чтобы в паре между собой они не развивали термоэдс. Это свойство должно сохраняться только в пределах возможных изменений температуры свободных концов (обычно от 0 до 100 °С).

На рис. 3.8 показана общая схема измерения температуры с помощью термоэлектрического термометра.

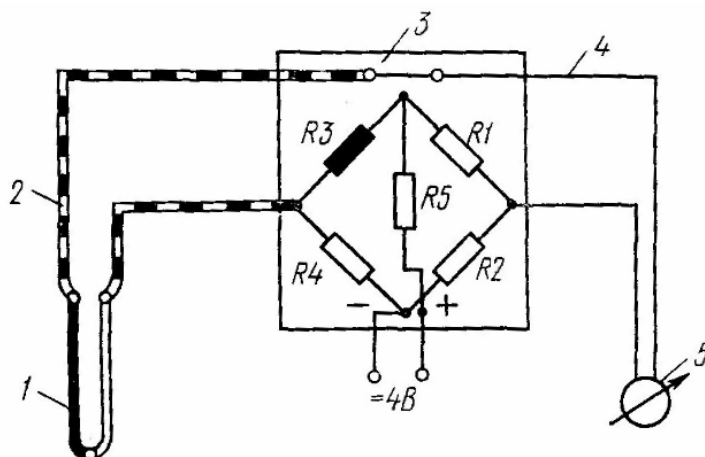


Рис. 3.8. Схема измерения температуры с помощью термоэлектрического термометра: 1 – термоэлектроды, 2 – компенсационные провода, 3 – коробка свободных концов, 4 – медные провода, 5 – измерительный показывающий прибор

Термоэлектроды 1 термоэлектрического термометра с помощью компенсационных проводов 2 подключаются к коробке свободных концов 3, расположенной в зоне постоянной температуры, а от нее медными проводами 4 присоединяются к милливольтметру 5 (или другому прибору, который может измерять малые эдс).

Коробка свободных концов ставится в тех случаях, когда соединительные линии от термоэлектрического термометра до милливольтметра по условиям измерений составляют значительную длину. Учитывая, что компенсационные провода имеют повышенную стоимость и сравнительно

высокое электрическое сопротивление, их прокладывают только до коробки свободных концов.

Измерительным элементом коробки свободных концов является мостиковая схема, собранная из резисторов $R1... R4$ и питающаяся от источника постоянного напряжения 4В. Резисторы $R1, R2, R4$ имеют постоянное сопротивление. Они сделаны из манганина. Резистор $R3$ – медный, является чувствительным элементом моста, служит для компенсации изменения температуры окружающей среды. При изменении температуры помещения, в котором находится коробка свободных концов, сопротивление резистора $R3$ соответственно изменяет свою величину, и в диагонали появляется напряжение. Диагональ моста включена последовательно с термопарой, и это напряжение складывается или вычитается с термоэдс термопары. Таким образом, производится компенсация изменения температуры свободных концов.

Термоэлектродвижущую силу термоэлектрических термометров измеряют специальными пирометрическими милливольтметрами или потенциометрами, описание которых дано в гл. 2.

При измерении температуры термоэлектрическими термометрами могут применяться различные схемы соединений. При измерении низких температур, когда термоэлектрический термометр развивает слишком малую термоэдс, термоэлектрические термометры можно соединить последовательно (положительный электрод последующего термоэлектрического термометра с отрицательным электродом предыдущего), тогда термоэдс будут складываться аналогично эдс последовательно соединенных батарей. Такое соединение называется *термобатареей*. Если необходимо измерить разницу температур в двух точках, термоэлектрические термометры, помещенные в этих точках, соединяют навстречу друг другу.

Термоэлектрическим термометрам, изготовленным из определенных материалов, присваивают градуировочные обозначения. На термоэлектрические термометры различных градуировок составлены градуировочные таблицы, содержащие характеристику термоэлектрического термометра из данного материала, то есть показывающие зависимость термоэдс от температуры. Термоэлектрические термометры имеют стабильную характеристику. Термоэдс, развиваемая ими, стандартизована, что делает термоэлектрические термометры взаимозаменяемыми.

Все материалы для термопар делят на две группы: пары из благородных металлов и пары из неблагородных металлов. Термопары из *благородных* металлов преимущественно из платины и ее сплава с родием обладают

высокой точностью и отличаются воспроизводимостью термоэлектрической характеристики. Эти термопары более устойчивы к коррозии и окислению, чем термопары из неблагородных металлов, и поэтому могут быть использованы при более высоких температурах. Термопары из *неблагородных* металлов применяют преимущественно для измерения более низких температур. Они дешевле термопар из благородных металлов, и на их долю приходится большинство всех применяемых термопар. Предусмотрено изготовление пяти типов термоэлектрических термометров: вольфрам-рений (5 % рения) – вольфрам-рениевые (20 % рения) типа ТВР; платинородий-платиновые типа ТПП; платинородий (30 % родия) – платинородиевые (6 % родия) типа ТПР; хромель-алюмелевые типа ТХА; хромель-копелевые типа ТХК. Кроме того, промышленность изготавливает нестандартные вольфраммолибденовые термоэлектрические термометры типа ВМ.

В табл. 1 приведены стандартные технические термопары.

Верхний предел температур, измеряемых термоэлектрическими термометрами, зависит от их типа. Так, термометр ТВР применяют для измерения температур до 1800, ТПП – до 1300, ТПР – до 1600, ТХА – до 1000, ТХК – до 600 °С.

Таблица 1

Стандартные технические термопары

Тип термопары	Градуировка	Материал термоэлектродов	Пределы применения, °С		
			нижний	верхний длительно	верхний кратко-временно
ТВР	ВР-5/20	Вольфрам-рений (5 % рения) – вольфрам-рений (20 % рения)	800	1800	2300
ТПР	ПР-30/6	Платинородий (30 % родия) – платинородий (6 % родия)	300	1600	1800
ТПП	ПП-1	Платинородий (10 % родия)-платина	минус 20	1300	1600
ТХА	ХА	Хромель-алюмель	минус 50	1000	1300
ТХК	ХК	Хромель-копель	минус 50	600	800
ТВР	ВР-10/20	Вольфрам-рений (20 % рения)	100	1800	2300

В практике измерений наиболее распространены погружные термоэлектрические термометры, то есть такие, которые измеряют температуру среды методом погружения рабочего спая в самую среду. Кроме того, есть поверхностные термоэлектрические термометры, измеряющие температуру поверхности, термоэлектрические термометры с водяным охлаждением,

термоэлектрические термометры карандашного типа и другие. У некоторых типов термоэлектрических термометров один из электродов является внешним, он сам служит защитной трубкой. Такие термоэлектрические термометры обладают пониженной тепловой инерцией, то есть они гораздо быстрее прогреваются при соприкосновении со средой.

На рис. 3.9 изображена конструкция термоэлектрического термометра погружного типа. Рабочий спай термоэлектрического термометра погружен в фарфоровый наконечник 2. Электроды термоэлектрического термометра изолированы друг от друга и от корпуса фарфоровыми бусами 4. Головка термоэлектрического термометра заключена в корпус 6, в котором смонтирована фарфоровая колодка 7.

Основные преимущества термоэлектрических термометров сводятся к тому, что они просты в изготовлении и не требуют посторонних источников электроэнергии с постоянным напряжением.

Недостатки термоэлектрических термометров – относительно небольшая точность при измерениях высоких температур, погрешность вследствие изменения температуры холодного спая.

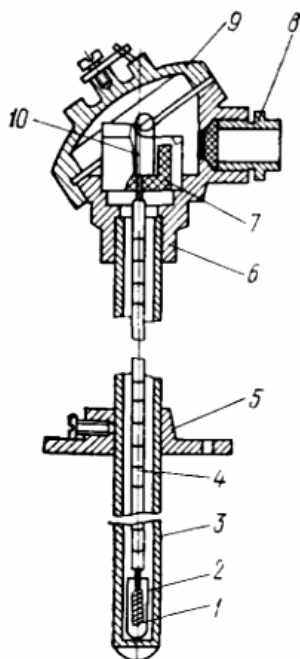


Рис. 3.9. Термоэлектрический термометр погружного типа: 1 – рабочий конец, 2 – фарфоровый наконечник, 3 – защитная коробка, 4 – фарфоровые бусы, 5 – передвижной фланец для крепления термометра, 6 – корпус головки, 7 – фарфоровая колодка, 8 – штуцер, 9 – крышка, 10 – зажимы

3.1.5. Термометры сопротивления

Электрическое сопротивление тел изменяется с изменением их температур. Эта особенность позволила создать устройства, называемые *термометрами сопротивления*. Чувствительным элементом термометра является

тонкая металлическая проволока. Проволоку наматывают на каркас и заключают в защитную арматуру. Измеряя электрическое сопротивление такой проволоки, можно судить о температуре, до которой она нагревается.

Термометрами сопротивления можно измерять температуру с передачей на значительное расстояние от места измерений.

В комплект аппаратуры, применяемой для измерения температуры, входят термометр сопротивления как чувствительный элемент, измерительный прибор, источник тока и соединительные провода, переключатель (в случае присоединения нескольких термометров к одному измерительному прибору).

Термометры сопротивления более подходят для измерения невысоких температур, чем термоэлектрические термометры, так как термоэлектрические термометры при температурах менее 300 °С имеют повышенную погрешность.

Термометры сопротивления чаще всего изготавливают из тонкой платиновой проволоки диаметром 0,015...0,07 мм или медной эмалированной проволоки диаметром 0,1 мм.

Материалы, используемые для изготовления термометров сопротивления, должны иметь максимальный и постоянный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), линейную зависимость сопротивления от температуры, обладать хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям окружающей среды.

В практике широкое применение нашли платиновые (ТСП) и медные (ТСМ) термометры сопротивления, различающиеся по материалу рабочей проволоки. Каждому из них присвоены свои градуировки.

Платиновые термометры ТСП разделяются на три градуировки – 20, 21, 22. Медные термометры сопротивления ТСМ имеют градуировки 23, 24.

Медные термометры сопротивления. В термометрах ТСМ в качестве чувствительного элемента применяют медную изолированную проволоку диаметром 0,1 мм. Так как медь имеет меньшее удельное сопротивление по сравнению с платиной, медной проволоки требуется значительно больше, чтобы получить одно и то же начальное сопротивление. Поэтому медную проволоку наматывают на пластмассовый стержень, покрытый несколькими слоями лака.

Выводы делают также из медной проволоки, изолируют один от другого, верхние части заключают в керамические трубки.

Медные термометры сопротивления применяют для измерения температуры от минус 50 до + 150 °С.

Термометры сопротивления защищают специальными чехлами, изготовленными из материала, имеющего высокую теплопроводность и высокую механическую прочность. Защитная арматура может иметь такую же головку, как для термоэлектрических термометров. Как платиновые, так и медные термометры сопротивления выпускаются с различной глубиной погружения. Термометр должен быть опущен в измеряемую среду всей погружаемой частью – от конца защитного кожуха до нижних витков резьбы головки.

Платиновые термометры сопротивления. Платина – лучший материал для изготовления термометров сопротивления. Она химически инертна и обладает удовлетворительной прочностью.

Платиновые термометры сопротивления позволяют измерять температуру от минус 200 до + 750 °С.

На рис. 3.10 изображена конструкция платинового термометра (ТСП). Чувствительный элемент платинового термометра изготовлен из платиновой проволоки 1 диаметром 0,05...0,08 мм, намотанной бифилярно на слюдяную пластинку 4, и помещен в защитную арматуру 8. Защитная арматура – это алюминиевая трубка, обеспечивающая защиту от механических повреждений и удобство работы с термометром сопротивления. У термометров сопротивления, предназначенных для измерения низких температур, трубку заливают парафином. Диаметр термометра сопротивления обычно равен 3...5 мм, общая длина 400...700 мм. Термометр погружается в измеряемую среду на 150...400 мм.

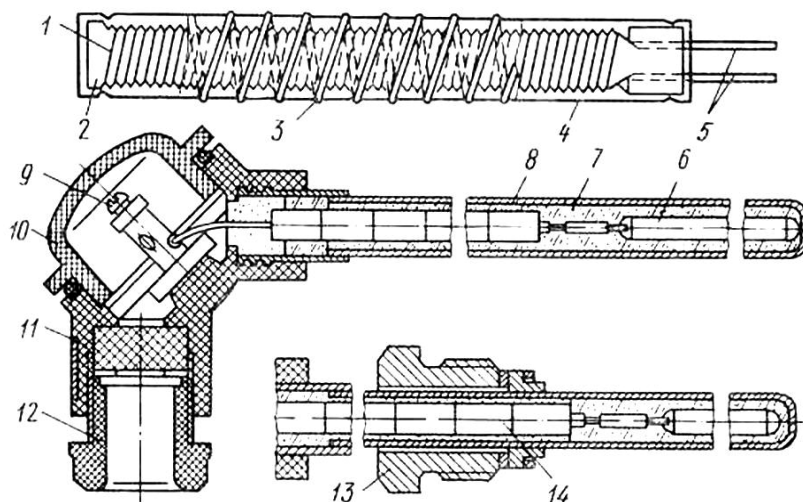


Рис. 3.10. Платиновый термопреобразователь сопротивления: 1 – платиновая проволока; 2 – каркас; 3 – серебряная лента; 4 – слюдяная пластинка; 5 – выводы; 6 – чувствительный элемент; 7 – оксид аммония; 8 – защитная арматура; 9 – зажим; 10 – крышка; 11 – головка; 12, 13 – штуцера под кабель и штуцер для крепления оправы; 14 – изоляторы

К достоинствам термометров сопротивления можно отнести возможность дистанционной передачи показаний и измерения температуры одним показывающим прибором от нескольких термометров сопротивления с помощью специальных переключателей.

Недостатками термометров сопротивления по сравнению с термоэлектрическими термометрами являются более сложное устройство и большая инерционность.

Полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы) изготавливаются из окислов различных металлов с добавками и используются для измерения температур в пределах от минус 90 до +180 °С. В отличие от металлических термометров сопротивления в этих термометрах происходит экспоненциальное уменьшение сопротивления при увеличении температуры, благодаря чему они обладают высокой чувствительностью. Конструктивное исполнение этих терморезисторов такое же, как и у металлических термометров сопротивления: в защитную оболочку (чехол) вкладывается полупроводник. Защитный чехол имеет два выхода для соединительных проводов.

Термисторы могут иметь самую разнообразную форму: цилиндрическую, в виде дисков, шайб, бусинок.

Преимуществами полупроводниковых термометров являются: более высокая чувствительность, большее номинальное сопротивление, меньшие габариты и инерционность.

Недостатками полупроводниковых термометров сопротивления являются меньшая точность, нестабильность их характеристик во времени и отсутствие взаимозаменяемости.

К достоинствам термометров сопротивления можно отнести возможность дистанционной передачи показаний и измерения температуры одним показывающим прибором от нескольких термометров сопротивления с помощью специальных переключателей.

Недостатками термометров сопротивления по сравнению с термоэлектрическими термометрами являются более сложное устройство и большая инерционность.

Измерение температуры термометрами сопротивлений, то есть измерение сопротивления датчика, осуществляется двумя способами: путем сравнения сопротивлений в мостовых схемах и с помощью стрелочных омметров – *логометров*.

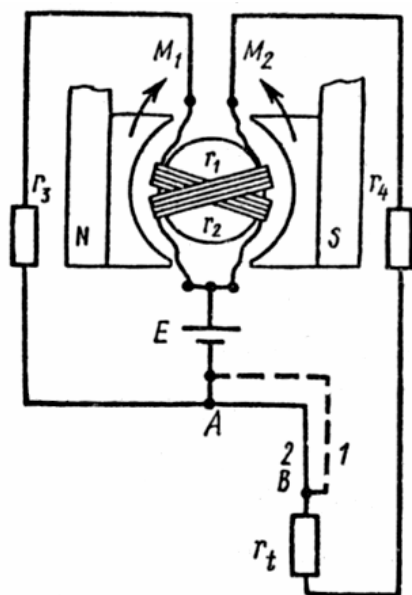


Рис. 3.11. Логометр.
Схема измерений

Принцип действия логометра (рис. 3.11) основан на взаимодействии магнитных полей двух скрещенных рамок подвижной системы с полем постоянного магнита. Рамки расположены таким образом, что их вращающие моменты M_1 и M_2 направлены навстречу, а подвижная система при этом поворачивается в сторону большего момента. Такое устройство обеспечивает нормальную работу прибора при колебаниях напряжения до $\pm 20\%$.

Термометр сопротивления r_t с логометром может соединяться по двух- или трехпроводной схеме. При двухпроводной схеме с изменением температуры окружающей среды изменяется и сопротивление соединительных проводов, что вносит погрешность. Для компенсации этой погрешности

прокладывается третий провод и источник питания подключается не к точке A , а к точке B , как показано на рис. 3.11 пунктирной линией. При такой трехпроводной схеме сопротивления проводов 1 и 2 оказываются подключенными к различным плечам измерительной схемы и взаимно компенсируются.

Автоматические мосты, применяемые в комплекте с термометрами сопротивлений, бывают уравновешенные и неуравновешенные, постоянного и переменного тока.

При измерении температуры с помощью уравновешенного моста термометр сопротивления включается вместо одного из плеч моста, а при использовании неуравновешенного моста датчик включается в цепь измерительной диагонали и служит указателем небаланса моста.

3.2. Измерение температуры термоэлектрическим методом

Цель: приобрести навыки расчета, позволяющие установить физический смысл измерения температуры термоэлектрическим методом.

Приводимые ниже формулы показывают физическую сущность действия рассматриваемых приборов и определяют принципы их работы.

Методика расчета

Для измерения температуры с помощью термопары необходимо:

- измерить термоэдс в цепи термопары;
- определить температуру свободных концов термопары;
- в измеренную величину термоэдс ввести поправку на температуру свободных концов;
- по известной зависимости термоэдс от температуры определить температуру рабочего спая.

Рассмотрим следующие типы задач.

Задача 1

Термоэдс в цепи термопары градуировки ХА $E(t_2t_1) = 45,13$ мВ. Температура свободных концов термопары $t_1 = 100$ °С. Необходимо определить температуру t_2 рабочего спая термопары.

Решение:

По [19, табл. 4-3], градуировка ХА термопар, находим, что термоэдс свободных концов термопары при $t_1 = 100$ °С равна $E(t_1) = 4,1$ мВ.

По формуле

$$E_{AB}(t_2t_1) = E_{AB}(t_2) - E_{AB}(t_1),$$

находим температуру рабочего спая:

$$E(t_2) = E(t_2t_1) + E(t_1) = 45,13 + 4,1 = 49,23 \text{ мВ}.$$

Температуру рабочего спая определяем по [19, табл. 4-3]. При $E(t) = 49,23$ мВ она равна 1210 °С.

При изменении температуры свободного конца термопары по отношению к градуировочному значению вводится поправка, определяемая по градуировочной таблице или же вычислением по формуле

$$\Delta = t'_1 k,$$

где Δ – поправка на измененную температуру свободного конца термопары;

t'_1 – действительная температура свободного конца термопары при градуировочной температуре; при условии, что $t_1 = 0$;

k – поправочный коэффициент; для грубых подсчетов можно принять для термопар из неблагородных металлов $k = 0,8 \dots 1,0$, для термопар из благородных металлов $k = 0,5 \dots 0,6$.

Задача 2

Надо определить действительную температуру, измеряемую платинородий-платиновой (ПП-1) термопарой, если прибор показывает $t = 800$ °С, а температура свободного конца вместо $t_1 = 0$ равна $t'_1 = 20$ °С; выбираем $k = 0,5$.

Решение:

Определяем поправку по формуле

$$\Delta = t'_1 k = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ °С};$$

Находим действительное значение температуры:

$$t_{\text{действ}} = 800 + 10 = 810 \text{ °С}.$$

Задача 3

Показание милливольтметра градуировки ХК со шкалой 200...300 °С равно $t_n = 260$ °С. Температура холодного спая $t_1 = 25$ °С. Прибор градуировался при $t_0 = 20$ °С. Требуется найти истинное значение t измеряемой температуры.

Решение:

Поправку на температуру холодного спая можно учесть по формуле

$$t = t_n + K(t_1 - t_0),$$

где $K(t_1 - t_0)$ – значение поправки; берем $K = 0,8$, тогда

$$t = 260 + 0,8(25 - 20) = 260 + 4,2 = 264,2 \text{ °С}.$$

3.3. Неконтактный метод измерения температуры

В рассмотренных ранее термометрах (термометры расширения, термоэлектрические, сопротивления) предусматривается непосредственный контакт между их чувствительным элементом и измеряемой средой. Верхний предел таких контактных методов измерения ограничивается температурой 1800 °С. Для определения более высоких температур без непосредственного контакта термометров с измеряемой средой применяют *пирометры*.

Из курса физики известно, что все нагретые тела излучают электромагнитные волны различной частоты. С ростом температуры увеличивается как частота волн излучения, так и их интенсивность. Это свойство используется при измерениях температур нагретых тел. Однако разные фи-

зические тела, будучи нагретыми до одной и той же температуры, обладают неодинаковой интенсивностью излучения, связанной с их индивидуальными физико-химическими свойствами. Наиболее хорошо изучены законы излучения абсолютно черного тела, которое реально в природе не существует и является математической абстракцией. Такие тела при заданной температуре обладают максимальной интенсивностью излучения и могут служить эталоном для различных физических тел. Поэтому шкалы пирометров градуируются по излучению абсолютно черного тела. Так как все физические тела излучают меньшую энергию, чем черное тело, пирометры показывают температуру более низкую, чем действительная температура нагретого тела.

По принципу действия различают *пирометры оптические* (монокроматические) и *радиационные* (полного излучения).

3.3.1. Оптические пирометры излучения

Оптические пирометры – это электрические устройства, в которых интенсивность излучений преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный яркостной температуре (температура монокроматического излучения) объекта.

Схема оптического пирометра с исчезающей нитью показана на рис. 3.12. При измерении наводят объектив 6 прибора на объект измерения 7, при этом фокусируется излучение на нить накала фотометрической лампы 5. Оператор, измеряющий температуру тела, через линзу 1 и красный светофильтр 2 наблюдает за изображением нити на фоне поверхности нагретого тела, добиваясь одинаковой яркости излучения нити и тела регулированием (реостатом 3) тока, проходящего через нить лампы от источника питания 4. Если яркость нити меньше, чем яркость излучения тела, нить кажется черной на светлом фоне, и наоборот, если яркость нити больше, чем яркость излучения тела, она будет светлой линией на более темном фоне. При совпадении яркостей изображение нити сольется с фоном излучения тела, и она будет невидима измерителю. В этом случае по шкале миллиамперметра A определяют температуру тела. Рассмотренные пирометры относят к визуальным приборам.

Существует другой тип оптических пирометров – фотоэлектрические (ФЭП), выпускаемые классом точности 1. В них яркостные температуры объекта и нити сравниваются фотоэлементами или фотосопротивле-

ниями, а измерение выполняется потенциометрами. Фотоэлектрические пирометры позволяют производить измерения без наблюдателя, и могут быть использованы в системах автоматического управления.

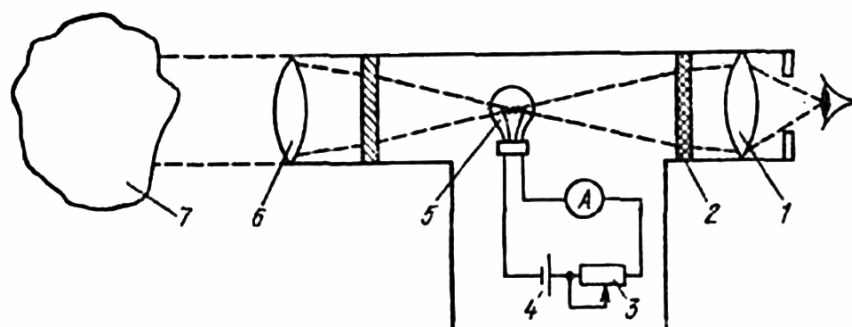


Рис. 3.12. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью накала:
1 – линза, 2 – светофильтр, 3 – реостат, 4 – источник питания,
5 – лампа, 6 – объектив, 7 – объект измерения

Промышленные оптические пирометры (частичного излучения, визуальные) применяются для измерения температур от 700 до 8000 °С и изготавливаются в основном в виде переносных приборов. Они используются для периодических измерений температуры в топках печей. Дополнительные погрешности при измерении могут возникать за счет изменения температуры окружающего воздуха выше или ниже 20 ± 5 °С.

3.3.2. Радиационные пирометры излучения

Радиационные пирометры (полного излучения) – это электрические устройства, в которых измеренная лучистая энергия преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный радиационной температуре объекта.

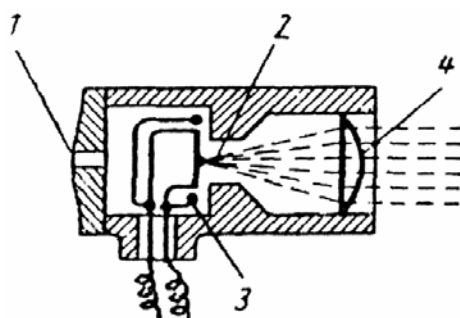


Рис. 3.13. Радиационный пирометр: 1 – глазок, 2 – термобатарея, 3 – никелевый компенсатор, 4 – линзы

В радиационном пирометре энергия сконцентрирована на чувствительном приемнике или преобразователе, который работает в системе измерения или управления. На рис. 3.13 показана принципиальная конструкция радиационного пирометра.

Точность радиационных пирометров обычно около $\pm 0,5$ %, а диапазон измерения 100...3000 °С и выше.

В телескопах радиационных пирометров, предназначенных для измерения температуры в пределах от 100 до 500 °С,

оптическая система выполнена из фтористого лития или флюорита; от 400 до 2000 °С – из кварцевого стекла; от 900 до 3000 °С и выше – из оптического стекла марки К-8.

Радиационные пирометры градуируются на радиационную температуру, соответствующую температуре «абсолютного черного тела». При измерении температур радиационными пирометрами используют «черные излучатели». «Черные излучатели» изготавливают из огнеупорных материалов, близких по своим свойствам к «абсолютному черному телу». В таких условиях радиационная температура получается близкой к действительной.

3.4. Методы и средства измерения давления

Давление – физическая величина, равная нормальной поверхностной силе, приходящейся на единицу площади. В зависимости от начальной точки отсчета одно и то же давление можно определить как *абсолютное, избыточное, атмосферное, дифференциальное давление и вакуум*. Все тела, находящиеся на земной поверхности, испытывают со всех сторон одинаковое давление атмосферы, окружающей земной шар. Это давление называется *атмосферным*. Измеряется, как правило, барометром и определяется как *барометрическое* давление. *Абсолютное давление* – полное давление с учетом давления атмосферы, отсчитываемое от абсолютного нуля. *Избыточное (манометрическое) давление* – давление сверх атмосферного, равное разности между абсолютным и атмосферным давлением. Избыточное давление отсчитывается от условного нуля, за который принимается атмосферное давление. *Вакуум (разрежение)* – давление ниже атмосферного. Обычно определяется как избыточное давление прибором, измеряющим разность между неизвестным давлением и атмосферным. *Дифференциальное давление* – разность двух измеряемых давлений, ни одно из которых не является давлением окружающей среды.

В СИ за единицу давления принят паскаль (Па). *Паскаль* – давление силы в один ньютон на площадь в один квадратный метр ($\text{Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Давление в контролируемых точках технологической схемы является весьма важным параметром, знание величины которого необходимо для управления технологическим процессом. Вследствие разнообразия требований созданы различные методы измерения давления и измерительная техника.

Различают приборы давления в зависимости от **измеряемой величины**:

1) *барометры* – для измерения барометрического (абсолютного) атмосферного давления;

2) *манометры* – для измерения избыточного давления – положительной разности между абсолютным и барометрическим давлением;

3) *вакуумметры* – для измерения вакуумметрического давления;

4) *моновacuумметры* – для измерения избыточного и вакуумметрического давления;

5) *напоромеры, тягомеры, тягонапоромеры* – для измерения небольших избыточных или вакуумметрических давлений до 40 кПа в газовых средах;

6) *дифференциальные манометры* – для измерения разности двух давлений (перепада), ни одно из которых не является давлением окружающей среды.

По **принципу действия** приборы для измерения давления классифицируют следующим образом:

1) *жидкостные*, в которых измеряемое давление (разрежение) уравновешивается давлением столба жидкости соответствующей высоты;

2) *пружинные*, в которых измеряемое давление уравновешивается силой, возникающей за счет деформации различного рода упругих элементов. Пружинные приборы могут быть подразделены на приборы, в которых чувствительным элементом является одновитковая пружина, многовитковая пружина, мембрана и сильфон (гармониковая мембрана);

3) *грузопоршневые приборы*, в которых сила, создаваемая измеряемым давлением уравновешивается силой, действующей на поршень определенного сечения. Эти приборы применяются в основном для лабораторных условий;

4) *электрические манометры*, действие которых основано на зависимости электрических параметров манометрического преобразователя от измеряемого давления.

3.4.1. Жидкостные манометры

Жидкостные (трубные) манометры отличаются простотой конструкции, небольшой стоимостью изготовления и относительно высокой точностью измерения, благодаря чему нашли широкое применение. Принцип действия этих манометров основан на уравновешивании измеряемого давления столба жидкости. Манометры выпускают нескольких типов: U-образные, однотрубные (чашечные), кольцевые, колокольные и поплавковые. Жидкостные U-образные манометры применяют для измерения небольших давлений и их перепадов.

Простейший жидкостной U-образный манометр состоит из U-образной стеклянной трубки, заполненной жидкостью, и прямолинейной миллиметровой шкалы (рис. 3.14, а). Шкала чаще всего бывает двусторонней, с нулевой отметкой посередине. Нижняя часть трубки заполнена до нулевой отметки. К одному концу трубки по гибкой резиновой или пластмассовой трубке подводится давление измеряемой среды. Под действием этого давления жидкость в одном колене трубки понижается, а в другом — повышается.

Разность уровней, определяемая по шкале, показывает избыточное давление измеряемой среды. Погрешность отсчета показаний составляет ± 2 мм столба рабочей жидкости и не зависит от диаметра трубок.

При частых изменениях давления измеряемой среды уровень жидкости в трубках колеблется, в связи с чем, трудно производить точный отсчет по шкале в обеих трубках одновременно. В этом случае более удобен *однотрубный (чашечный)* манометр (рис. 3.14, б). Он состоит из сосуда (чашки), сечение которого во много раз больше сечения трубки. При измерении давления уровень жидкости в трубке малого сечения поднимается на большую высоту, в то время как в чаше большого сечения опускается незначительно. Поэтому показания прибора можно отсчитывать только по изменению уровня жидкости в трубке малого сечения, пренебрегая изменением уровня в чаше.

Если к U-образному или чашечному манометру давление подводится только к одному концу трубки, то измеряется разность подведенного и атмосферного давлений. В этом случае другой конец трубки открыт и сообщается с атмосферой. Если же к обоим концам трубки или чаше и трубке подвести давление контролируемых сред, то манометр будет измерять разность этих давлений. Такие манометры называют *дифференциальными манометрами*.

Жидкостной манометр (дифманометр), называемый «*кольцевыми весами*» (рис. 3.15), представляет собой металлическую трубку, согнутую в кольцо, разделенную перегородкой 2. С обеих сторон перегородки имеются два штуцера 3, соединенных с точками замера. Кольцо 1 до половины заполнено рабочей жидкостью и покоится на призматической опоре 4. В зави-

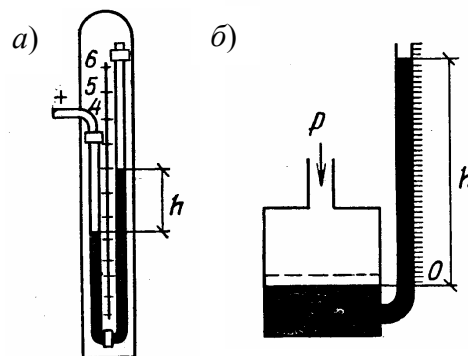


Рис. 3.14. Жидкостной манометр:
а) U-образный; б) чашечный

симости от разности давлений будут изменяться разность уровней рабочей жидкости h и угол поворота кольца до тех пор, пока масса столба жидкости не уравнивается грузом-противовесом 6; при этом стрелка прибора 5 покажет на шкале величину измеряемого давления.

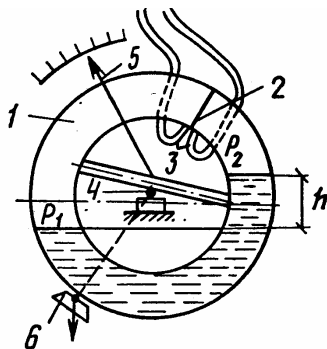


Рис. 3.15. Манометр типа «кольцевые весы»: 1 – кольцо; 2 – перегородка; 3 – штуцера; 4 – призматическая опора; 5 – стрелка; 6 – груз-противовес

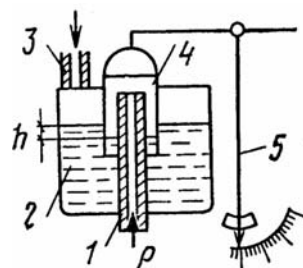


Рис. 3.16. Колокольный манометр: 1 – трубка; 2 – трансформаторное масло; 3 – трубка; 4 – колокол; 5 – стрелка

Колокольные манометры (дифманометры) (рис. 3.16) предназначены для измерения давления неагрессивных газов. Чувствительным элементом прибора является колокол 4, частично погруженный в трансформаторное масло 2 и соединенный системой рычагов со стрелкой 5. Внутри колокола введена трубка 1, соединенная с измеряемой средой. При изменении давления в подколокольном пространстве колокол поднимается либо опускается, приводя в движение стрелку прибора. При использовании прибора в качестве дифманометра к колоколу подводится разность давлений: большее давление создается в пространстве над колоколом с помощью трубки 3, меньшее – в пространстве под колоколом.

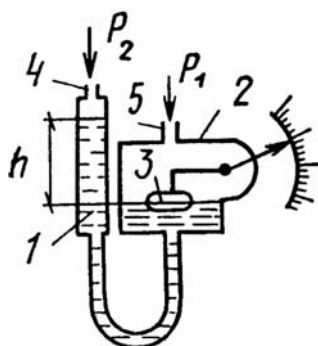


Рис. 3.17. Поплавковый манометр: 1, 2 – сосуды; 3 – поплавок; 4, 5 – трубки

Значение перемещения колокола может быть преобразовано в изменение комплексной взаимоиנדуктивности. В этом случае прибор работает в комплекте со вторичными миниатюрными ферродинамическими приборами. Дифманометры выпускаются на перепады давлений $10 \dots 40 \text{ кгс/см}^2$ ($1 \dots 4 \text{ МПа}$). Основная погрешность измерения этих приборов составляет $\pm(1,6 \dots 4 \%)$.

Поплавковые манометры (рис. 3.17) состоят из двух сообщающихся сосудов 1 и 2, заполненных ртутью. На поверхности широкого

сосуда 2 плавает стальной поплавок 3. Если с помощью трубки 5 соединить этот сосуд со средой с избыточным давлением, которое должно быть измерено, уровень ртути в нем опустится. Поплавок, опускаясь, приведет в движение стрелку, которая покажет величину избыточного давления.

При измерении разности давлений к сосудам дифманометра подводятся две трубки 4 и 5, соединенные с измеряемой средой. Перепад давлений уравнивается весом столба жидкости h . Сохраняя размер широкого сосуда и изменяя диаметр и высоту узкого сосуда, можно при одном и том же ходе поплавка измерять различные предельные перепады давления.

3.4.2. Пружинные манометры

Приборы для измерения давления, основанные на упругой деформации чувствительных элементов под действием измеряемой величины, широко используют в технических измерениях. В качестве упругих чувствительных элементов этих приборов применяют мембраны, мембранные коробки, сильфоны, трубчатые пружины. Мембраны, мембранные коробки и сильфоны используют также в дифманометрах.

Соответственно по этим **принципам конструктивного исполнения** выпускаются манометры с:

- 1) одновитковыми трубчатыми пружинами;
- 2) многовитковыми трубчатыми пружинами;
- 3) плоскими мембранами;
- 4) гармониковыми мембранами.

В настоящее время выпускают показывающие и самопишущие манометры с одновитковой (МТ) и многовитковой (МТМ) трубчатой пружиной. Рассмотрим подробнее эти приборы

Манометры с трубчатой пружиной являются приборами, в которых измеряемое давление последовательно преобразуется в перемещение незакрепленного конца пружины и связанного с ним показывающего, сигнализирующего устройства (в первичных приборах) или преобразователем давления в унифицированный электрический сигнал (в схемах дистанционной передачи сигналов вторичному прибору).

Принцип действия **манометра с одновитковой пружиной** показан на рис. 3.18. Один конец пружины впаян в камеру, а другой соединен передаточным механизмом со стрелкой прибора. Камера соединена с измеряемой

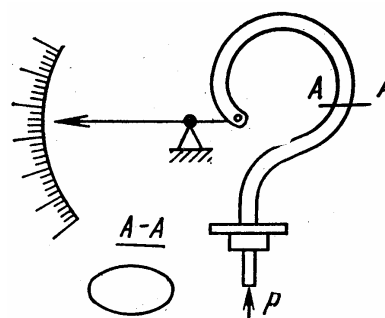


Рис. 3.18. Манометр одновитковой трубчатый

средой через резьбовой штуцер. При повышении измеряемого давления пружина стремится выпрямиться, свободный ее конец начинает перемещаться, и передаточный механизм приводит в движение стрелку, которая по шкале прибора указывает давление.

Для увеличения чувствительности манометра используют многовитковые пружины. Рассмотрим конструкцию и принцип действия **манометра с многовитковой трубчатой пружиной** типа МСТМ (рис. 3.19). Многовитковая пружина 2 представляет собой полую трубку с 5...7 витками, расположенными по винтовой линии. Пружина одним концом *A* неподвижно закреплена в корпусе прибора и через капиллярную трубку 1 соединяется с измеряемой средой. Второй свободный конец *B* пружины наглухо закрыт и через втулку соединен с осью 4.

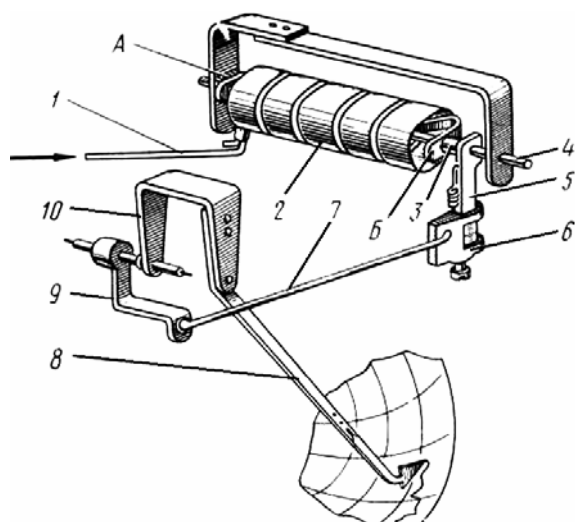


Рис. 3.19. Манометр с многовитковой трубчатой пружиной: 1 – капиллярная трубка; 2 – пружина; 3 – втулка; 4 – ось; 5 – рычаг; 6 – каретка; 7 – тяга; 8 – держатель пера; 9 – мостик; 10 – поводок; *A*, *B* – концы пружин

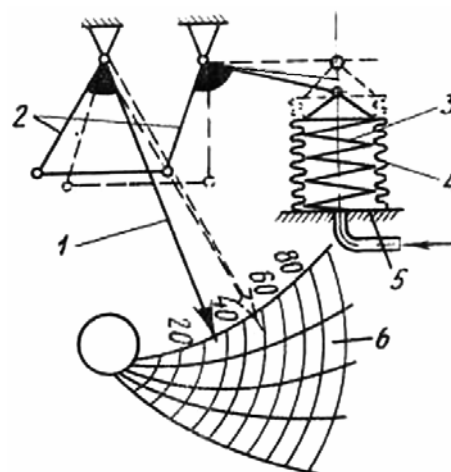


Рис. 3.20. Сильфонный манометр: 1 – стрелка; 2 – рычаги; 3 – пружина; 4 – сильфон; 5 – основание; 6 – шкала

Многовитковая трубчатая пружина длиннее одновитковой, поэтому ее свободный конец при том же давлении перемещается значительно больше. Под действием давления пружина, раскручиваясь, поворачивает ось и сидящий на ней рычаг 5 с кареткой 6. Поворот рычага и каретки передается через тягу 7, поводку 10 и мостик 9. С мостиком жестко связан держатель пера 8. С изменением давления перо движется по диаграммной бумаге и записывает давление. Диаграммную бумагу перемещает часовой механизм или электрический синхронный двигатель. Манометры с многовитковой пружиной применяют главным образом как самопишущие при-

боры. Их используют также для дистанционной передачи показаний на расстояние. В этом случае в манометр встраивают электрическое или пневматическое передающее устройство.

В **сильфонных манометрах** чувствительным элементом является гармониковая мембрана – сильфон, выполненный из упругого металла (нержавеющая сталь, томпак и другие сплавы). Сильфонные манометры используют для измерения небольших давлений и вакуума и в качестве показывающих (индекс «П») и самопишущих (индекс «С») приборов.

Принципиальная конструктивная схема манометра МСС изображена на рис. 3.20. Чувствительным элементом прибора является гармониковая мембрана – сильфон 4, который представляет собой гофрированную тонкостенную металлическую трубку, изготовленную из высокопрочного сплава. Сильфоны преобразуют измеряемое давление в тяговое усилие, перемещающее стрелку манометра. Один конец сильфона закреплен на жестком неподвижном основании 5, другой герметически закрыт. Давление подводят внутрь сильфона через основание. Если давление больше атмосферного, то длина сильфона увеличивается, вследствие чего стрелка 1 (или перо) прибора через систему рычагов 2 движется по шкале 6. Пружина 3 увеличивает жесткость сильфона.

Основная погрешность приборов находится в пределах $\pm 1,5 \%$.

Самыми разнообразными по конструкции чувствительных элементов являются приборы с *мембранными элементами*. Для линеаризации статической характеристики применяют гофрированные мембраны и мембранные коробки. Чаще всего используют мембранные коробки, жесткость которых меньше, чем жесткость отдельной мембраны.

Различные мембраны, так же как и другие чувствительные элементы, применяют в показывающих и самопишущих первичных приборах прямого действия и в бесшкальных приборах со встроенными преобразователями давления в унифицированный сигнал с силовой компенсацией.

Эти приборы применяют для измерения избыточного давления неагрессивных жидкостей или газов. Они обычно используются в комплекте со вторичными приборами типа КСД, КВД, входящими в состав ГСП. Пределы измерения разности давления $0,4 \dots 2500 \text{ кгс/см}^2$ ($0,04 \dots 250 \text{ МПа}$). Класс точности этих приборов 1 и 1,5.

3.4.3. Электрические манометры

Кроме первичных приборов давления и приборов со встроенными преобразователями (давление – перемещение – унифицированный электрический сигнал) существуют электрические приборы давления, в чувст-

вительных элементах которых происходит прямое преобразование давления в электрический измерительный сигнал.

Рассмотрим электрические манометры, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления веществ от измеряемого давления. Их называют *тензопреобразователями*. Тензопреобразователи изготавливают из полупроводников, платины, сплавов меди и никеля. В приборах давления их используют в качестве чувствительных элементов, механически соединенных с мембраной или пружиной прибора, которая деформируется под действием измеряемого давления.

В последнее время большое распространение получили приборы для измерения давления серии «Сапфир», в которых в качестве чувствительного элемента служит сапфировая мембрана с напыленными полупроводниковыми сопротивлениями. Полупроводниковые тензопреобразователи в сравнении с металлическими обладают большей чувствительностью, малыми размерами и массой.

Существует несколько типов преобразователей давления «Сапфир-22»:

- Сапфир-22 ДА – абсолютного давления;
- Сапфир-22 ДИ – избыточного давления;
- Сапфир-22 ДВ – разрежения;
- Сапфир-22ДД – разности давлений;
- Сапфир-22 ДИВ – давления разрежения;
- Сапфир-22 ДГ – гидростатического давления.

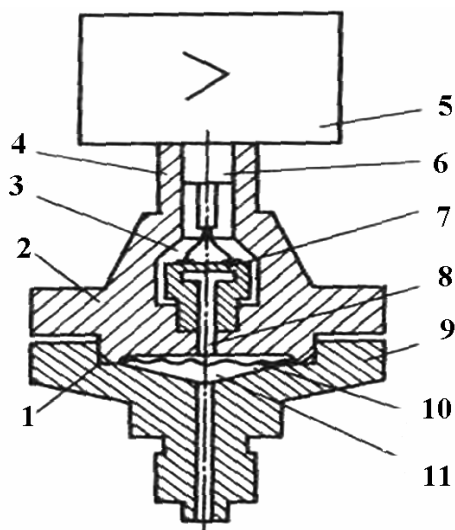


Рис. 3.21. Мембранный манометр САПФИР-22ДИ: 1 – прокладка; 2 – основание; 3 – полость; 4 – измерительный блок; 5 – электронное устройство; 6 – гермовывод; 7 – мембранный тензопреобразователь; 8 – полость тензопреобразователя; 9 – фланец; 10 – мембрана; 11 – камера

В качестве примера рассмотрим принцип действия манометра «Сапфир-22ДИ» (рис. 3.21). Он предназначен для измерения избыточного давления и состоит из измерительного блока 4 и унифицированного электронного устройства 5. Внутри основания 2 блока 4 размещен мембранный тензопреобразователь 7, полость 8 которого заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 10. Мембрана приварена по наружному контуру к основанию 2.

Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, прочно соединенная с мембраной 10. Основное свойство тензорезисторов – способность изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от степени прогиба мембраны тензопреобразователя.

Измеряемая величина (давление среды в технологическом аппарате или трубопроводе) подается в камеру 11 фланца измерительного блока и через жидкость, заполняющую тензопреобразователь, воздействует на мембрану, вызывая ее прогиб и изменение электрического сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается от измерительного блока в электронное устройство 5 по проводам через вывод 6. Электронное устройство преобразует этот сигнал в токовый выходной сигнал манометра, значение которого зависит от измеряемого давления.

Эти манометры предназначены для работы в системах автоматизации в качестве измерительных преобразователей давления или разрежения со вторичной регистрирующей и показывающей аппаратурой и автоматическими регуляторами, работающими от стандартного электрического входного сигнала 0...5, 0...20 или 4... 20 мА постоянного тока.

Недостатками приборов серии «Сапфир» являются необходимость индивидуальной градуировки и зависимость показаний прибора от температуры измеряемого объекта. Из-за последнего недостатка приходится вводить в измерительную схему приборов с тензопреобразователями устройства термокомпенсации.

Напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры используют для измерения малых давлений и разрежений: напоромеры – для избыточных давлений до 40 кПа, тягомеры – для малых разрежений (вакуума), тягонапоромеры – для малых давлений и разрежений.

Вакуумметры. Эти приборы служат для измерения вакуумметрического давления (ниже атмосферного). Принцип действия их аналогичен принципу действия пружинных манометров с одновитковой трубчатой пружиной. В вакуумметрах давление внутри трубчатой пружины меньше атмосферного, поэтому она не стремится выпрямиться (как в пружинных манометрах), а, наоборот, еще больше скручивается.

Мановакуумметры. Эти приборы служат для измерения избыточного и вакуумметрического давления. С правой стороны от нулевой отметки шкалы ведут отсчет избыточного давления, а с левой – вакуума.

3.5. Расчет жидкостно-механических манометров

Цель: освоить методики расчета поплавкового дифманометра, дифференциального колокольного тягомера.

Теория и методика расчета

Поплавковый дифманометр чаще всего используется для измерения перепада давлений. Схема дифманометра представлена на рис. 3.22.

При равенстве давлений P_1 и P_2 уровни жидкости в обоих сосудах занимают одинаковое положение. При подаче в широкий (плюсовой) сосуд 1 давления P_1 , а в узкий (минусовый) сосуд 2 давления P_2 (примем $P_1 > P_2$) уровень жидкости в плюсовом сосуде понизится на h_1 , а в минусовом сосуде – повысится на h_2 . Так как разность давлений уравновешивается весом столба жидкости H , то условие равновесия в приборе характеризуется уравнением

$$\Delta P = H(\gamma_p - \gamma_c),$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$ – разность давлений;

$H = h_1 + h_2$ – высота столба уравновешивающей жидкости;

γ_p – удельный вес уравновешивающей жидкости;

γ_c – удельный вес среды, находящейся над уравновешивающей жидкостью.

Так как

$$\frac{\pi D^2}{4} h_1 = \frac{\pi d^2}{4} h_2,$$

где D и d диаметры плюсового и минусового сосудов, то условие равновесия можно записать в виде

$$\Delta P = h_1 \left(1 + \frac{D^2}{d^2} \right) (\gamma_p - \gamma_c)$$

или

$$\Delta P = k_1 k_2 h_1,$$

то есть измеряемая величина выражается величиной перемещения поплавка,

где $k_1 = 1 + \frac{D^2}{d^2}$ – постоянная величина;

$k_2 = \gamma_p - \gamma_c$ – постоянный коэффициент при постоянных γ_p и γ_c .

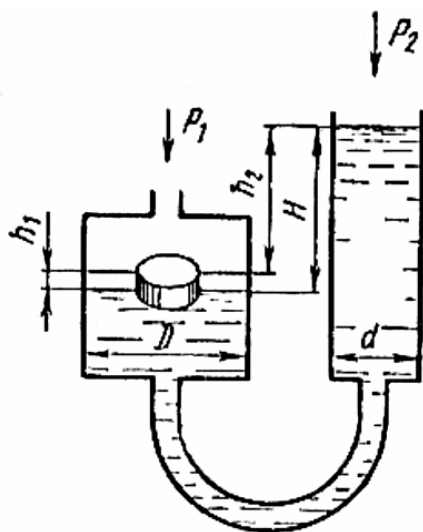


Рис. 3.22. Схема поплавкового дифманометра

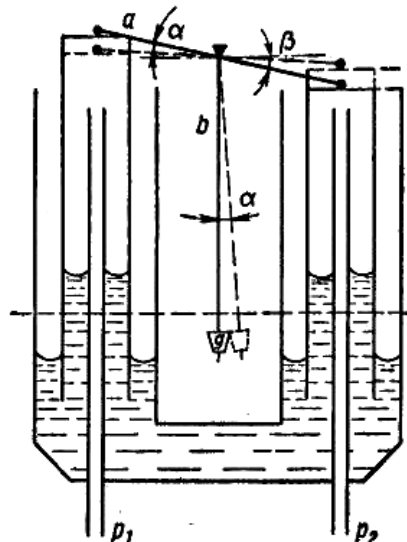


Рис. 3.23. Схема дифференциального колокольного тягомера

Дифференциальный колокольный тягомер (рис. 3.23). Условие равновесия в приборе характеризуется уравнением

$$\Delta p = \frac{g \cdot b \cdot \sin \alpha}{f \cdot a \cdot \cos(\beta - \alpha)}$$

где Δp — измеряемая разность давления ($p_1 - p_2 = \Delta p$);

g — вес груза, укрепленного на стержне;

b — расстояние от точки вращения до центра тяжести и системы груз-коромысло;

α — угол отклонения коромысла или стержня;

f — внутренняя площадь сечения колокола (ввиду незначительности величины площади стенок колокола последней пренебрегают);

a — длина плеча коромысла;

β — угол, образованный между коромыслом и горизонтом.

3.6. Методы и средства измерения влажности

Влажность газов, жидкостей и твердых материалов — один из важных показателей в технологических процессах. Влажность газов, например, необходимо измерять в сушильных установках, при очистке газов, при кондиционировании воздуха и т. д.

Влажность – физический параметр смеси газа и водяного пара; мера влажности – доля водяного пара, содержащегося в этой смеси.

Влажный воздух является смесью сухого воздуха и водяного пара. Влажность воздуха оценивается абсолютной влажностью, влагосодержанием d , температурой точки росы $t_{T.P.}$, относительной влажностью φ и энтальпией (теплосодержанием) I .

Влажность измеряется следующими методами: психометрическим, гигроскопическим, по точке росы, электролитическим, весовым.

3.6.1. Психометрический метод измерения влажности воздуха

Классическим методом измерения влажности воздуха является психометрический метод. Приборы, основанные на этом методе, называются психрометрами. Психрометры измеряют температуры сухого t_C и мокрого t_M термометров. Температурные условия, близкие к t_M , создаются в процессе адиабатического испарения воды с поверхности мокрого термометра. Зная t_C и t_M , можно определить относительную влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{P_M - A(t_C - t_M) \cdot B}{P_C} \cdot 100,$$

где P_M и P_C – упругость насыщенного водяного пара соответственно при температурах t_C и t_M ;

A – психометрическая постоянная, зависящая от рода газа, скорости потока вокруг мокрого термометра, температуры t_M и конструкции прибора;

B – барометрическое давление.

Принцип действия психрометра представлен на рис. 3.24. Для измерения температуры t_C и t_M , применяют проволочные (полупроводниковые)

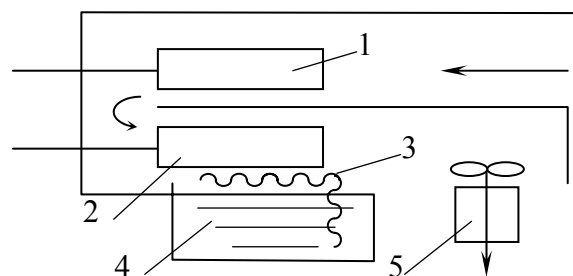


Рис. 3.24. Принцип действия психрометра: 1 и 2 – сухой и мокрый термометры; 3 – батист, смачиваемый водой; 4 – емкость; 5 – вентилятор

термометры сопротивления и термопары в комплекте с автоматическими мостами или потенциометрами.

Основная погрешность при измерении по психометрическому термометру не превышает $\pm 3\%$ относительной влажности. Дополнительно погрешность увеличивается на $\pm 2\%$ за счет погрешности вторичного прибора и колебаний температуры окружающего воздуха.

Диапазон измерения психрометрами относительной влажности 20...100 % при температуре 5...50 °С.

Психрометрический метод позволяет определить энтальпию (теплосодержание) влажного воздуха по формуле

$$I = f(t_M).$$

Достоинствами датчиков влажности психрометрического типа можно считать малые инерционные свойства и достаточную точность при соблюдении определенных условий.

Большим недостатком датчиков психрометрического типа является сложность конструктивного устройства.

Гигроскопический метод измерения влажности применяется, в системах кондиционирования воздуха. Этот метод основан на использовании линейного и объемного расширения материала при изменении влажности. В качестве гигроскопических высокочувствительных материалов используются человеческий волос, брусок канадской сосны, капрон, вязкая пленка и другие материалы. Точность измерения составляет $\pm(3...5)\%$ относительной влажности.

3.6.2. Метод точки росы

Метод точки росы применяется для измерения влажности газов. Используя этот метод, определяют температуру поверхности $t_{T.P.}$, при которой устанавливается динамическое равновесие между количеством влаги, испаряющейся с поверхности и осаждаемой на поверхности зеркала из газа. Практически измеряют температуру поверхности металлического зеркала, которое охлаждается до тех пор, пока не появится конденсат (роса). С помощью терморегулятора поддерживают температуру поверхности таким образом, чтобы количество конденсата не изменялось. По температурам t_C и $t_{T.P.}$ можно определить относительную влажность. Метод позволяет измерять влагосодержание d воздуха – $d = f(t_{T.P.})$.

На рис. 3.25 приведена принципиальная схема датчика влажности, основанного на методе фиксации точки росы. Цилиндр 1, имеющий тщательно отполированную поверхность, помещается в воздушную среду, влажность которой регулируется. Через внутреннюю полость этого цилиндра непрерывно протекает охлаждающая жидкость. Температура жидкости регулируется с помощью электроподогревателя 2, устанавливаемого в трубопроводе перед цилиндром.

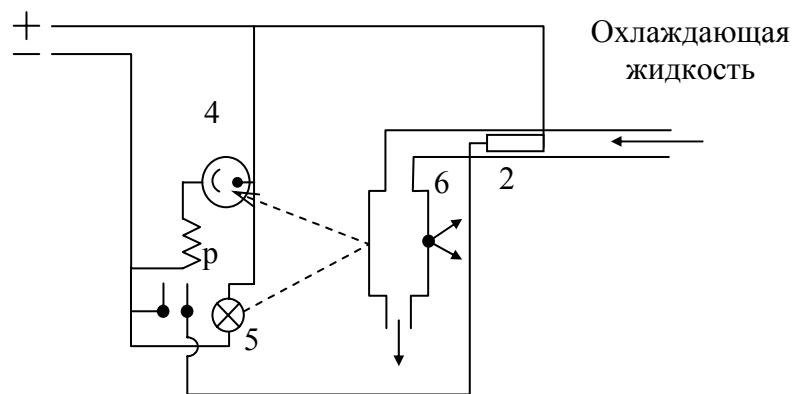


Рис. 3.25. Принципиальная схема датчика влажности: 1 – цилиндр;
2 – электроподогреватель; 3 – электромагнитное реле;
4 – фотоэлемент; 5 – лампа накаливания; 6 – термопара

Температура охлаждающей жидкости зависит от температуры точки росы регулируемой среды и поддерживается равной ей с помощью электромагнитного реле 3, по обмотке которого протекает фототок фотоэлемента 4. Фотоэлемент освещается световым лучом лампы накаливания 5, отраженным от зеркальной поверхности цилиндра. На поверхность цилиндра припаявается термопара 6, являющаяся датчиком температуры точки росы.

Датчик работает следующим образом: в тот момент, когда стенки цилиндра будут охлаждены до точки насыщения (точки росы), появляющийся на поверхности зеркала, туман ослабляет световой поток, идущий на фотоэлемент, уменьшая фототок. В результате этого срабатывает электромагнитное реле и замыкает цепь электроподогревателя. Электроподогреватель начинает нагревать охлаждающую жидкость, температура которой поднимается выше точки насыщения. Образовавшийся у поверхности цилиндра туман исчезает, и реле выключает электроподогреватель. Затем снова начинается процесс охлаждения поверхности цилиндра до точки росы.

Таким образом, на поверхности цилиндра устанавливается температура, соответствующая температуре точки росы регулируемой среды и воспринимаемая с помощью датчика-термопары.

Следовательно, в датчиках влажности воздуха, основанных на методе фиксации температуры точки росы, имеют место все те погрешности, которые свойственны датчикам температуры. В датчиках точки росы также возникают погрешности, вызванные изменениями барометрического давления, так как температура точки росы воздуха зависит от последнего. Все это снижает широкое применение таких датчиков. Достоинство метода точки росы заключается в возможности измерять влажность воздуха при очень высоких температурах.

К недостаткам датчиков влажности, основанных на методе точки росы, можно отнести:

- необходимость непрерывной подачи охлаждающей жидкости;
- наличие зеркально отполированной поверхности, за чистотой которой необходимо следить;
- малую точность, объясняемую неизбежной разницей между точкой росы и точкой насыщения;
- большие инерционные свойства прибора, вызываемые в основном значительными массами охлаждаемой жидкости, и зависимость их от скорости движения воздуха;
- сложность обслуживания прибора.

3.6.3. Электролитический метод измерения влажности

Широко применяются электролитические датчики влажности, принцип действия которых основан на зависимости электрических свойств чувствительного элемента от влажности контролируемого воздуха или газа. По принципу действия и конструктивному исполнению эти датчики подразделяются на подогревные и неподогревные.

Неподогревные датчики имеют чувствительный элемент из гигроскопического материала, нанесенного между электродами, электрическое сопротивление которого изменяется при изменении влажности. Наиболее распространен датчик в виде полоски из полистирола, покрытой с обеих сторон влапочувствительной пленкой, содержащей хлористый литий. Electrodes из благородных металлов (золото, платина) наносят на пластинку методом напыления на влапочувствительную пленку. Такие кондуктометрические гигрометры применяются для измерения относительной влажности в широком диапазоне при температуре от минус 40 до +50 °C. Погрешность измерения зависит от колебаний атмосферного давления и температуры. Инерционность такого датчика тем меньше, чем тоньше влапочувствительная пленка (постоянная времени – 1...3 с).

Весьма перспективным является **сорбционно-кондуктометрический метод**, основанный на изменении электрического сопротивления полупроводниковых пленок (окись цинка, окись алюминия) или кристаллов (силикагель, алюмогель) при поглощении ими влаги. Разработанные с использованием этого принципа влагомеры позволяют измерять влажность в газообразных средах с точностью 3 %.

Принцип работы **подогревных** хлористо-литиевых **гигрометров** основан на автоматическом поддержании температуры слоя электролита, при

которой влажность контролируемого воздуха соответствует давлению водяного пара в точке фазового перехода «раствор – соль». При наличии контакта поверхности кристаллов гигроскопической соли с влажным воздухом в первый момент времени влага адсорбируется поверхностью кристалла, которая в результате адсорбции покрывается тонкой пленкой насыщенного раствора данной соли. Затем продолжается адсорбция воды поверхностью раствора данной соли. При этом концентрация раствора у поверхности понижается, вследствие чего постепенно происходит полное растворение кристаллов гигроскопической соли. При дальнейшей адсорбции воды концентрация раствора снижается и, следовательно, повышается давление паров воды над поверхностью раствора. Адсорбция воды замедляется и полностью прекращается, когда давление водяного пара над поверхностью раствора станет равным давлению водяного пара в воздухе. Процесс адсорбции заканчивается и достигается фазовое равновесие «пар – раствор». Приборы измеряют температуру фазового равновесия (равновесную температуру), соответствующую температуре точки росы, при этом фиксируется парциальное давление водяных паров в воздухе.

Приборы, принцип действия которых основан на методе фиксации температуры фазового равновесия, называют *подогревными*, так как для достижения равновесной температуры им необходим источник теплоты. Таким источником теплоты является *электролит* – насыщенный раствор гигроскопической соли, по которому проходит электрический ток. При постоянном напряжении питания количество выделяемой теплоты зависит от количества электролита, которое, в свою очередь, определяется разностью температур между насыщенным раствором и воздухом. При отклонении температуры от равновесной нарушается равенство давлений, вследствие чего происходит массоперенос между насыщенным раствором и воздухом до тех пор, пока количество выделяемой теплоты не будет достаточным для поддержания температуры фазового равновесия.

В качестве гигроскопической соли широко используется хлористый литий. Конструкция подогревного хлористолитиевого датчика влажности представлена на рис. 3.26. Внутри трубки-изолятора 1 помещен термометр сопротивления 2, а снаружи – влагочувствительный элемент, который состоит из стеклотканого чулочка 3, пропитанного хлористолитиевым раствором, с навитой на него электрической спиралью 4. Спираль, подключенная к источнику переменного напряжения 5, предназначена для пропускания электрического тока через раствор гигроскопической соли, смазывающий стеклотканый чулочек. В датчике устанавливается колебатель-

ный процесс изменения температуры около среднего ее значения $t_{T.P.}$, равно- го значению равновесной температуры, соответствующей измеряемой влаж- ности. Температура точки росы измеряется термометром сопротивления, на- ходящимся внутри датчика. Погрешность такого датчика составляет $\pm 2 \%$. В качестве вторичного прибора используется автоматический мост.

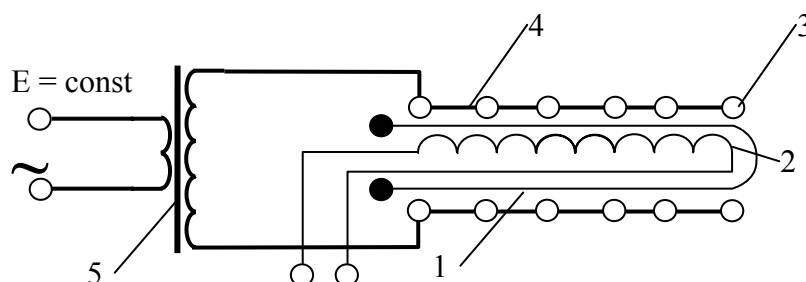


Рис. 3.26. Конструкция подогревного хлористо-литиевого датчика влажности:
1 – трубка-изолятор; 2 – термометр сопротивления; 3 – стеклотканый чулочек;
4 – электрическая спираль; 5 – источник напряжения

Недостатком подогревных датчиков является то, что даже при крат- ковременном отключении электропитания цепи подогрева возникает зна- чительная погрешность показаний и требуется регенерация соли.

При автоматизации систем кондиционирования воздуха используют сорбционные и подогревные гигрометры. В группу сорбционных электро- литических гигрометров входят датчики с вторичным прибором типов УДРОВ, СПР, СПР-103, ВВЧ.

3.7. Методы и средства измерения расхода и количества вещества

Для контроля и управления технологическим процессом большое значение имеет измерение расхода и количества различных веществ: газов, жидкостей, пара и т. д. Расход вещества – это его количество, протекаю- щее через сечение трубопровода в единицу времени. Количество измеряют в единицах объема (м^3 , см^3) или массы (т, кг, г). Соответственно может из- меряться объемный ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{см}^3/\text{с}$) или массовый (кг/с, кг/ч, г/с) расход.

В соответствии с общепринятыми положениями прибор или устрой- ство, служащие для измерения расхода вещества, называются *расходоме- рами*, а прибор или устройство, служащие для измерения количества веще- ства – *счетчиками количества* (счетчиками).

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков. Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров:

- *переменного перепада давления*, измеряющие расход по перепаду давления на местных сужениях (стандартизированного и нестандартизированного профиля) потока измеряемой среды;
 - *постоянного перепада давления* (обтекания); измеряющие расход по сечению потока у подвижного сопротивления (поплавка), обтекаемого измеряемой средой;
 - *тахометрические*, измеряющие расход по частоте вращения ротора, крыльчатки или другого тела, расположенного в потоке измеряемой среды;
 - *электромагнитные* (индукционные), измеряющие расход по электродвижущей силе (эдс), индуцируемой электропроводной жидкостью, пересекающей магнитное поле.
 - *ультразвуковые*, действие которых основано на сложении скорости распространения ультразвука в жидкости и скорости самого потока жидкости.
- Счетчики количества применяются двух основных разновидностей:
- *тахометрические* (скоростные), аналогичные тахометрическим расходомерам, но без устройства для отсчета мгновенного расхода;
 - *объемные*, измеряющие количество среды по числу отмеренных равных объемов, порций или доз.

Счетчики количества применимы лишь для жидких и газовых сред небольших температур и давлений.

3.7.1. Расходомеры переменного перепада давления

Расходомеры переменного перепада давления состоят из трех элементов: сужающего устройства, дифференциального манометра для измерения перепада давления (дифманометра – расходомера) и соединительных линий с запорной и предохранительной арматурой.

Принцип действия расходомеров переменного перепада основан на измерении давления по перепаду, который создается в трубопроводе установленным внутри него сужающим устройством. В суженном сечении увеличиваются скорость, а следовательно, и кинематическая энергия потока, что вызывает уменьшение его потенциальной энергии. Соответственно статическое давление потока после сужающего устройства будет меньше, чем перед ним. Разность между статическими давлениями потока, взятыми

на некоторых расстояниях до и после сужающего устройства, называют перепадом давления.

Для некоторых сужающих устройств, как преобразователей расхода в перепад давлений, коэффициент передачи определен экспериментально и его значения сведены в специальные таблицы. Такие сужающие устройства называются стандартными (рис. 3.27).

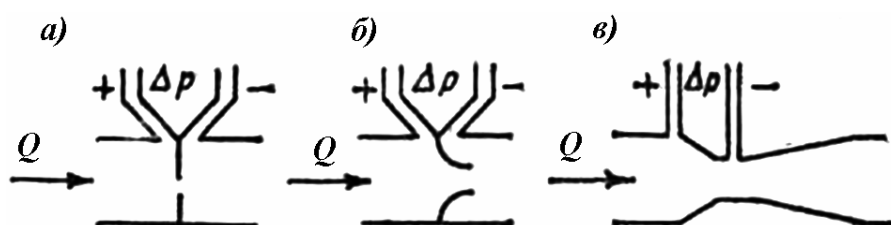


Рис. 3.27. Стандартные сужающие устройства:
а) диафрагма; б) сопло Вентури; в) труба Вентури

Наиболее простым и распространенным сужающим устройством является диафрагма (рис. 3.27, а). Стандартная диафрагма представляет собой тонкий диск с круглым отверстием в центре. От стойкости диафрагмы и особенно входной кромки отверстия существенно зависит ее коэффициент передачи. Поэтому диафрагмы изготовляют из материалов химически стойких к измеряемой среде и устойчивых против механического износа. Кроме диафрагмы, в качестве стандартных сужающих устройств применяют также сопло Вентури (рис. 3.27, б), трубу Вентури (рис. 3.27, в), которые создают меньшее гидравлическое сопротивление в трубопроводе.

Сужающее устройство расходомера переменного перепада давлений является первичным преобразователем, в котором расход преобразуется в перепад давлений.

Промежуточными преобразователями для расходомеров переменного перепада давлений служат дифманометры. Дифманометры связаны с сужающим устройством импульсными трубками и устанавливаются в непосредственной близости от него. Поэтому в расходомерах переменного перепада давлений обычно используют дифманометры, снабженные промежуточным преобразователем для передачи результатов измерений на щит оператора (например, мембранные дифманометры типа ДМ).

Так же как при измерении давления и уровня, для защиты дифманометров от агрессивного воздействия измеряемой среды применяют разделительные сосуды и мембранные разделители.

Особенностью первичных преобразователей расходомеров переменного перепада давлений является квадратичная зависимость перепада давлений от величины расхода.

К достоинствам расходомеров переменного перепада относится возможность использования их при различных температурах и давлениях измеряемой среды, а к недостаткам – потеря давления потока и относительная трудность промышленного применения расходомеров при малых расходах.

Погрешность измерений приборов этой группы составляет 1...2 %. Они могут применяться для измерения расходов как жидкостей, так и газа при температурах до сотен градусов и давлениях до десятков мегапаскалей.

3.7.2. Расходомеры постоянного перепада давления

Действие расходомеров постоянного перепада основано на измерении расхода с помощью поплавка, перемещающегося внутри конической трубки под действием выталкивающего давления жидкости или газа, подаваемых снизу. Отдельного сужающего устройства такие приборы не имеют. Наибольшее распространение получили расходомеры-ротаметры.

Ротаметры выпускают для местного измерения расхода без дистанционной передачи показаний, с электрической дистанционной передачей показаний без местной шкалы и с пневматической дистанционной передачей и местной шкалой показаний.

Основные достоинства ротаметров – простота конструкции, возможность измерения малых расходов, значительный диапазон измерения, возможность измерения расхода агрессивных сред; недостатки – большая чувствительность к температурному изменению вязкости (особенно при измерении малых расходов), невозможность измерения расхода загрязненных жидкостей и жидкостей, из которых выпадают осадки.

Рассмотрим устройство и принцип действия ротаметров для местного измерения показаний и с дистанционной передачей показаний.

Ротаметр для местного измерения показаний (рис. 3.28) представляет собой вертикальную конусную трубку 2, в которой находится поплавок 1.

Принцип действия ротаметра состоит в следующем. Поток измеряемой жидкости или газа, перемещаясь внутри трубки снизу вверх, поднимает поплавок. Его подъем вызван тем, что в кольцевом зазоре между поплавком и стенкой трубки образуется перепад давления, который зависит от скорости движения потока и размеров зазора. При этом давление на поплавок снизу бывает больше, чем сверху.

Во время подъема поплавок кольцевой зазор увеличивается, так как трубка внутри имеет конусную форму, а перепад давления уменьшается. По мере подъема поплавок на него будет действовать снизу все меньшая сила, остановится он на том уровне в трубке, при котором его масса будет уравновешена перепадом давления. Высота подъема поплавка зависит от расхода: чем больше расход, тем выше поднимается поплавок. Расход определяют по положению поплавка относительно шкалы 3, нанесенной на стенке стеклянной трубки. Такие ротаметры предназначены для установки в вертикальных участках трубопроводов при потоке снизу вверх и рассчитаны на рабочее давление до 0,6 МПа.

Промышленность выпускает ротаметры со стеклянными и металлическими трубками. У ротаметров со стеклянной трубкой РМ шкала нанесена прямо на поверхности трубки.

Для дистанционного измерения положения поплавка в металлической трубке используют промежуточные преобразователи линейного перемещения в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

В ротаметрах с электрическим выходным сигналом типа РЭД вместе с поплавком 1 перемещается плунжер дифференциально-трансформаторного преобразователя 3 (рис. 3.29, а). В ротаметрах с пневматическим выходным сигналом типа РПД (рис. 3.29, б) для передачи положения поплавка преобразователю 4 используется магнитная муфта 5. Она состоит из двух постоянных магнитов. Один – сдвоенный – перемещается вместе с поплавком, другой, укрепленный на рычаге преобразователя перемещения в давление сжатого воздуха 4, двигается вместе с рычагом вслед за первым магнитом.

Выпускаются также ротаметры РПФ для измерения расхода сильно-агрессивных сред. У таких ротаметров все детали, соприкасающиеся с измеряемой средой, изготовлены из фторопласта-4. Ротаметры РПО снабжены рубашкой для парового обогрева. Они предназначены для измерения расхода кристаллизующихся сред.

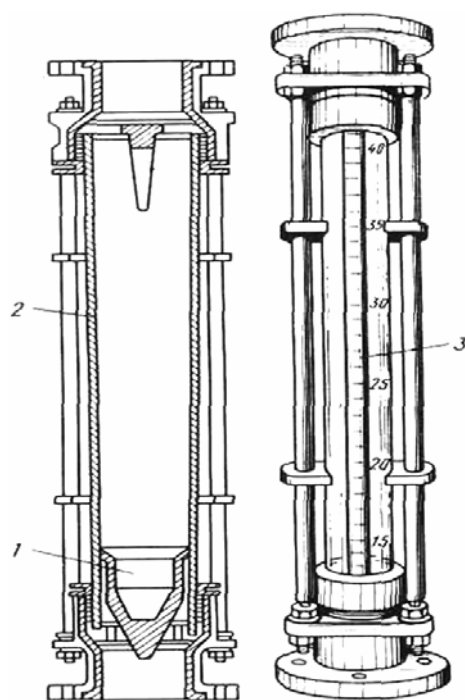


Рис. 3.28. Ротаметр местного измерения показаний: 1 – поплавок; 2 – коническая трубка; 3 – шкала

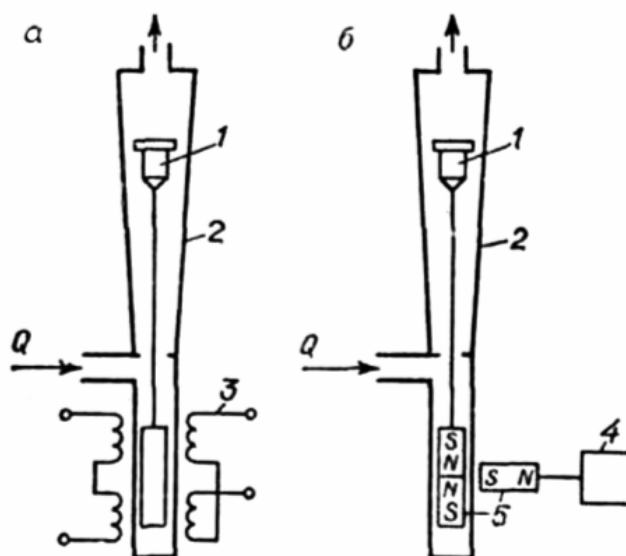


Рис. 3.29. Ротаметры с дистанционной передачей показаний: а) с дифференциально-трансформаторным преобразователем; б) с пневматическим преобразователем; 1 – поплавок; 2 – конусная трубка; 3 – дифференциально-трансформаторный преобразователь; 4 – преобразователь перемещения в давление сжатого воздуха; 5 – магнитная муфта

3.7.3. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковой метод измерения расхода основан на зависимости скорости распространения ультразвука относительно трубы от скорости потока жидкости.

Главные сложности применения ультразвукового метода заключаются в следующем:

- скорость звука в среде зависит от ее физико-химических свойств, температуры, давления;
- скорость звука значительно больше скорости потока, расход которого подлежит измерению;
- скорость распространения ультразвукового сигнала в движущейся среде весьма незначительно отличается от скорости в среде неподвижной.

Все это предопределяет применение специальных методов компенсации погрешностей, что серьезно усложняет измерительные схемы.

Ультразвуковые расходомеры (УЗР) применяются в основном для измерения расходов жидких сред, так как в газовой среде коэффициент поглощения ультразвука велик, а интенсивность распространения ультразвуковой волны мала.

Основными элементами преобразователей УЗР являются излучатели и приемники ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые колебания, по-

ступая на приемник, вызывают его механическую деформацию, то есть периодическое сжатие и растяжение.

В качестве излучателей и приемников колебаний используются различные пьезоэлементы, имеющие большой пьезомодуль d и высокую (1100...1500) диэлектрическую проницаемость, в несколько раз большую, чем у кварца.

Ультразвуковые расходомеры подразделяются на две группы. К первой группе относятся расходомеры с направлением ультразвукового излучения перпендикулярно оси потока (рис. 3.30).

Пьезоэлемент 1 (излучатель), возбуждаемый генератором 2, создает ультразвуковые колебания, направленные перпендикулярно оси трубы (потока). По мере увеличения средней скорости потока V_{cp} ультразвуковой луч все больше и больше отклоняется по направлению скорости движения среды, расход которой измеряется. Угол отклонения луча θ определяется выражением

$$\theta = \arcsin(V_{cp} / c) \approx V_{cp} / c,$$

где c – скорость распространения ультразвука в неподвижной среде.

Линейное отклонение луча на приемных элементах 3 и 4 (см. рис. 3.30):

$$\delta = D \operatorname{tg} \theta \approx D(V_{cp} / c).$$

По мере увеличения V_{cp} количество энергии, воспринимаемой пьезоэлементом 3, уменьшается, а на пьезоэлементе 4 – увеличивается. Таким образом, разностный сигнал, поступающий на вход усилителя 5, увеличивается.

Расходомеры описанного принципа достаточно просты в изготовлении, но обладают ограниченной точностью из-за малого отклонения луча, генерируемого пьезоэлементом 1.

Наибольшее применение получили расходомеры второй группы, основанные на измерении скорости прохождения ультразвуковых сигналов между излучателем и приемником в направлении движения потока контролируемой среды и против него.

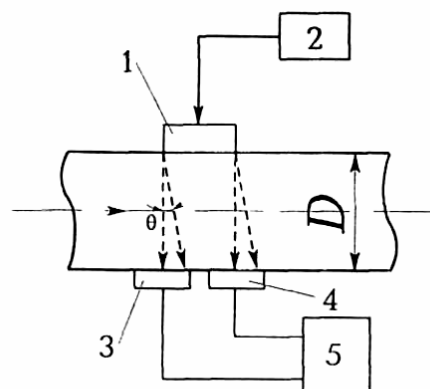


Рис. 3.30. Ультразвуковой расходомер с излучением, перпендикулярным оси потока: 1 – излучатель, 2 – генератор, 3, 4 – приемные пьезоэлементы, 5 – усилитель

Причем преимущественно векторы V_{cp} и c направлены под углом друг к другу. В этом случае, чем меньше α (рис. 3.31, а), тем чувствительнее и точнее расходомерное устройство.

Расходомеры выполняются по одноканальной (рис. 3.31, а, в) или двухканальной (рис. 3.31, б, г) схеме.

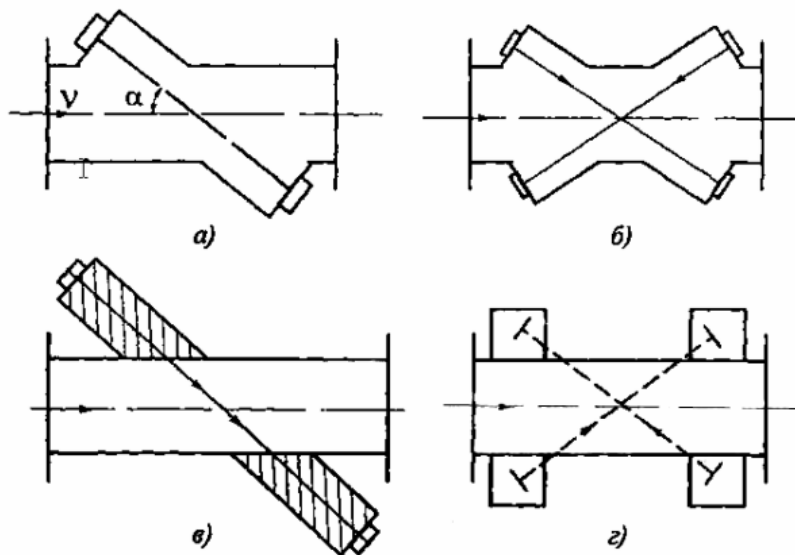


Рис. 3.31. Принципиальные схемы ультразвуковых расходомеров:
а), в) одноканальные; б), г) двухканальные

При измерении расхода чистых сред пьезоэлементы устанавливаются в специальных карманах (рис. 3.31, а). В случае измерения расхода загрязненных потоков применение карманов исключается, так как по мере накопления отложений характеристики расходомера будут меняться.

В таком случае либо карманы заполняются твердым материалом — ультразвукопроводом (рис. 3.31, в), либо используются излучатели и приемники, не требующие нарушения целостности трубы (рис. 3.31, г).

Принцип действия расходомеров второй группы заключается в точном определении разности времени прохождения ультразвукового импульса против и по потоку среды, расход которой контролируется.

Если расстояние между излучателем и приемником равно L , а угол между векторами скорости потока среды V_{cp} и ультразвука c равен α , то время распространения сигнала по потоку:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + V_L \cos \alpha} \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{V_L}{c} \cos \alpha \right),$$

где V_L — скорость среды, усредненная по длине пути луча от излучателя до приемника.

При прохождении импульса против потока

$$\tau_2 = \frac{L}{c - V_1 \cos \alpha} \approx \frac{L}{c} \left(1 + \frac{V_L}{c} \cos \alpha \right).$$

Таким образом, разность времени прохождения импульсов

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 2L \frac{\cos \alpha}{c^2} V_L.$$

Следовательно, показания ультразвуковых расходомеров второй группы напрямую зависит от усредненной по ходу луча скорости потока V_L , а не по диаметру трубы, что является основополагающей особенностью двухканальных расходомеров.

По методу измерения $\Delta\tau$ (разности времен прохождения сигнала против и по потоку) УЗР относят к время-импульсным, частотным и импульсным расходомерам.

Во *время-импульсных* расходомерах периодически осуществляется измерение разности $\Delta\tau$ времен прохождения импульсов длительностью 0,1...0,2 мкс по и против потока, по которой затем определяется объемный расход потока. Применение расходомеров данного типа требует очень точного знания скорости ультразвука в контролируемой среде, а также характера его изменения в зависимости от температуры и давления в трубопроводе.

В *частотных* расходомерах каждый последующий импульс посылается излучателем только после достижения предыдущим импульсом приемного пьезоэлемента. Разность частот следования сигналов по потоку и против измеряется специальной дифференциальной схемой и напрямую связана со скоростью и объемным расходом среды. Важнейшим достоинством частотных расходомеров является независимость их показаний от скорости распространения ультразвукового сигнала в неподвижной среде, а, следовательно, и от физико-химических свойств потока (среды).

В *фазовых* расходомерах измерению подлежит разность фаз $\Delta\varphi$ ультразвуковых колебаний, проходящих по потоку и против него. Один из недостатков таких расходомеров – зависимость их показаний от изменения c (скорости ультразвука в неподвижной среде).

Приведенное описание принципа действия УЗР демонстрирует одновременно их основные и наиболее существенные недостатки:

- сильная зависимость показаний расходомера от профиля скоростей в потоке, формирующегося и изменяющегося по мере изменения (увеличения или уменьшения расхода);

- значительное влияние на показания расходомера имеет изменение физико-химических свойств контролируемой среды, ее температуры и давления, оказывающих влияние на скорость ультразвука.

К достоинствам ультразвуковых расходомеров необходимо отнести:

- возможность использования на трубопроводах широкого диапазона диаметров (от 10 мм и выше);
- возможность бесконтактного измерения расходов любых сред, в том числе и неэлектропроводных.

Основная погрешность ультразвуковых расходомеров (без коррекции на изменение скорости звука в среде по температуре и давлению) находится в пределах $\pm 2 \dots 4 \%$. Одноканальные расходомеры с коррекцией на скорость звука позволяют снизить погрешность до $\pm 1 \%$. В отдельных современных разработках основная погрешность может не превышать $\pm 0,3 \%$.

3.7.4. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров базируется на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется эдс, пропорциональная скорости движения жидкости.

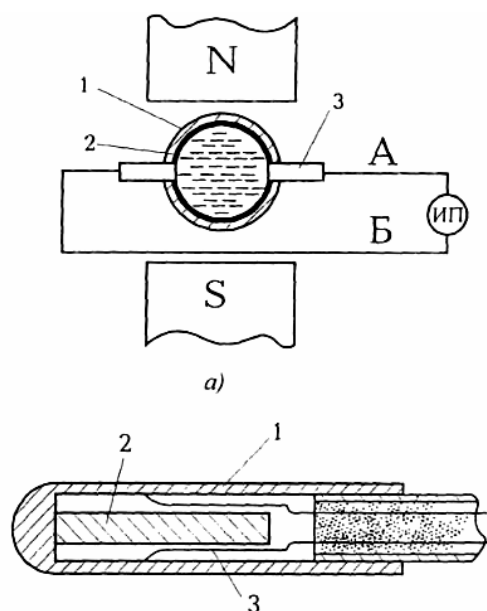


Рис. 3.32. Принципиальная схема электромагнитного расходомера: а) с внешним магнитом; б) с внутренним магнитом; 1 – корпус; 2 – изоляция; 3 – электроды

Серийно выпускаемые современные электромагнитные расходомеры рассчитаны для измерения расхода жидкости с электропроводностью не менее 10^{-3} См/м, что соответствует электропроводности воды. Производятся и специальные расходомеры, способные измерять расход жидкостей с электропроводностью до 10^{-5} См/м.

На рис. 3.32 представлена принципиальная схема электромагнитного расходомера.

Корпус 1 преобразователя расхода выполняется из немагнитного материала и покрывается изнутри электрической изоляцией 2 (резиной, фторопластом), располагаемой по окружности трубы. Корпус преобразователя размещается

между полюсами магнита (на рис. 3.32, *a* – это постоянный магнит). Через стенки трубы, электроизолированной от нее, по диаметру строго перпендикулярно оси магнита вводятся электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью.

По закону электромагнитной индукции, при осесимметричном профиле скоростей в жидкости, между электродами 3 будет наводиться эдс:

$$E = BDV ,$$

где B – индукция магнитного поля;

D – длина жидкостного проводника, равная расстоянию между электродами или диаметру измерительного участка;

V – средняя скорость жидкости.

Учитывая, что средняя скорость потока связана с объемным расходом соотношением

$$V = \frac{4G_0}{\pi D^2} ,$$

получаем

$$E = \frac{4BG_0}{\pi D} .$$

Из этого выражения следует, что индуцируемая эдс прямо пропорциональна измеряемому объемному расходу.

Измерение эдс осуществляется измерительным прибором (ИП) (рис. 3.32, *a*), к которому предъявляются жесткие требования по значению его входного сопротивления R_0 .

Для обеспечения малого влияния внутреннего сопротивления преобразователя R_{π} необходимо соблюдение следующего соотношения

$$\frac{R_0}{R_{\pi}} = 100 \dots 500 .$$

Применение постоянных магнитов в расходомерах данного типа позволяет уменьшить помехи от внешних электромагнитных полей, а также увеличить быстродействие приборов.

Основной сложностью использования расходомеров с постоянными магнитами является поляризация электродов. В результате этого на границах электродов создается эдс поляризации, направленная против основной измеряемой эдс, что изменяет во времени градуировочную характеристику прибора и ставит под вопрос стабильность его работы. Поэтому электро-

магнитные расходомеры с магнитным полем нельзя применять для жидкостей с ионной проводимостью.

Как при турбулентном, так и при ламинарном течении потока показания электромагнитного расходомера при одном и том же расходе и осесимметричном потоке будут одинаковы. Это основное преимущество расходомеров электромагнитного типа по сравнению со всеми остальными расходомерами. В случае нарушения осевой симметрии потока деформация поля скоростей оказывает паразитное влияние на показания электромагнитных расходомеров.

В качестве примера рассмотрим индукционный расходомер, изображенный на рис. 3.33.

Магнитное поле создается электромагнитом 1, жидкость движется по участку немагнитной (сталь X18H9T) трубы 2, эдс снимается двумя электродами Э, помещенными в поток жидкости, значение эдс измеряется в блоке ИБ. Электроды соединены с измерительным блоком, экранированным кабелем. С измерительного блока может быть выдан электрический сигнал постоянного тока 0...5 мА, пропорциональный расходу жидкости, на вторичные приборы: миллиамперметр типа М374, потенциометры ПС, ПСР и другие. Расстояние от места измерения до вторичного прибора должно быть не более 1 км, суммарное сопротивление линии вместе со вторичным прибором не более 2,4 кОм. Немагнитная труба с электродами может быть установлена в любом положении при условии полного ее заполнения контролируемой жидкостью.

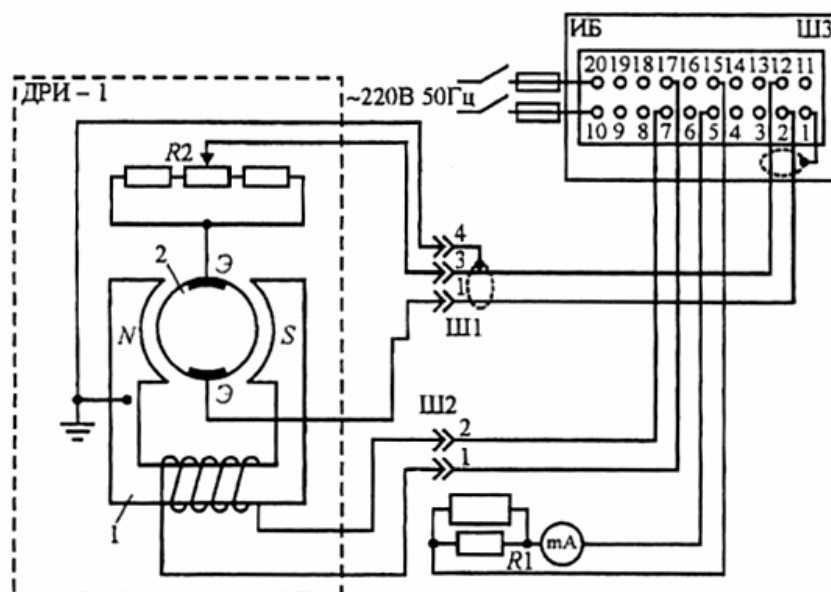


Рис. 3.33. Индукционный расходомер: 1 – электромагнит; 2 – немагнитная труба

Индукционные расходомеры (например, ИР-11, ИР-51, ИР-61) обычно используют для измерения расходов от 0,32 до 2500 м³/ч в трубопроводах от 10 до 300 мм.

К достоинствам электромагнитных расходомеров необходимо отнести:

- независимость показаний от вязкости и плотности жидкости, расход которой регистрируется;
- возможность применения в трубопроводах любых диаметров;
- отсутствие падения давления на измерительном участке;
- высокое быстродействие расходомеров с постоянным электромагнитом;
- возможность измерения расходов агрессивных, а также с включением абразивных составляющих жидкостей;
- работоспособность при высоких давлениях потока (до 100 МПа);
- высокую точность (0,5...1,0 %) и достаточно широкий диапазон измерений: 1:20 и даже 1:100.

Один из недостатков электромагнитных расходомеров – возможность отложения магнетита (при его присутствии в воде) на внутренней (изолированной) поверхности преобразователя расхода, что приводит к систематической погрешности в измерении расхода.

3.7.5. Счетчики количества

Счетчики количества жидкости по принципу действия подразделяют на скоростные, объемные и весовые. *Скоростные* счетчики бывают со спиральной горизонтальной (для измерения больших расходов) и с вертикальной (для измерения малых расходов) вертушкой.

Скоростные счетчики со спиральной горизонтальной вертушкой устанавливают в закрытых трубопроводах таким образом, чтобы через них проходил весь поток измеряемой жидкости. Протекающий через счетчик поток измеряемой жидкости воздействует на вертушку: чем больше средняя скорость протекающей жидкости, а, следовательно, и ее количество, тем быстрее вращается вертушка. Вертушка механически связана со счетным механизмом, шкала которого отградуирована в единицах количества (как правило, в м³).

Счетный механизм прибора может быть помещен непосредственно в измеряемой жидкости или защищен от нее сальником. В приборах, счетный механизм которых находится в измеряемой жидкости, показания отсчитывают через защитное стекло, отделяющее камеру расходомера от наружной среды. Такие приборы по своей конструкции более просты, однако их детали быстро изнашиваются от воздействия жидкости.

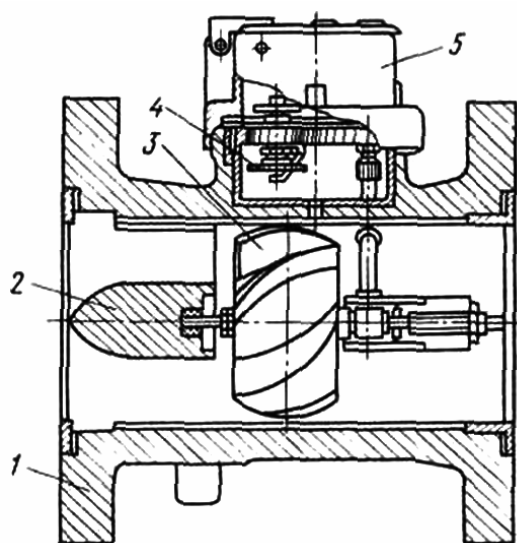


Рис. 3.34. Скоростной счетчик со спиральной горизонтальной вертушкой: 1 – корпус; 2 – струевыпрямитель; 3 – вертушка; 4 – передаточный механизм; 5 – счетный механизм

Рассмотрим конструкцию и принцип действия скоростного счетчика, изображенного на рис. 3.34. Поток поступающей жидкости выравнивается струевыпрямителем 2 и направляется на лопатки вертушки 3, которая выполнена в виде многозаходного винта. Вращение вертушки через червячную пару и передаточный механизм 4 передается счетному механизму 5.

Объемные счетчики делятся на приборы с овальными шестернями, поршневые и дисковые.

Рассмотрим принцип действия счетчика с овальными шестернями (рис. 3.35). Его действие основано на вытеснении из измерительной камеры

1 прибора, определенных объемов жидкости вращающимися овальными шестернями 2. Обе шестерни находятся в непрерывном зацеплении и обкатывают друг друга. При этом на них действует разность давлений: между большим – со стороны входа жидкости и меньшим – со стороны выхода. В результате перепада давлений в трубопроводе (до и после счетчика) образуется сила, заставляющая шестерни вращаться. При этом каждая из шестерен при полном обороте проталкивает половину объема жидкости, поступающей в камеру, а обе шестерни за один оборот пропускают количество жидкости, равное полному объему камеры прибора.

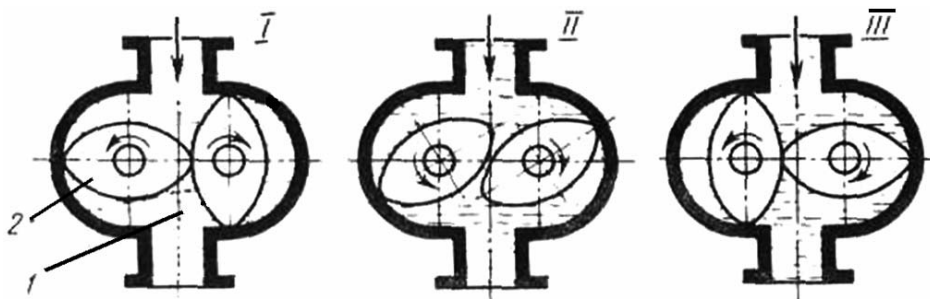


Рис. 3.35. Схемы работы объемного счетчика с овальными шестернями: 1 – камера; 2 – шестерни

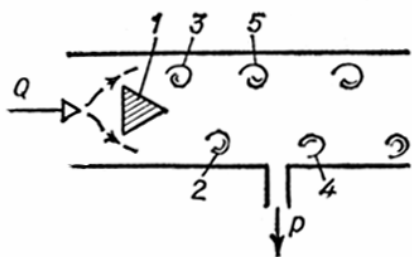


Рис. 3.36. Вихревой расходомер: 1 – тело; 2...5 – вихри

Частота вращения овальных шестерен неравномерна и зависит в каждый момент времени от их взаимного расположения. Но это не влияет на процесс измерения, так как счетчик подсчитывает только число оборотов шестерен.

Вращение шестерен передается посредством магнитной муфты и передаточного механизма стрелочному указателю и счетному механизму.

Счетчики количества газа делятся на барабанные (для лабораторных измерений), клапанные (в основном используют в быту) и ротационные (для измерения больших количеств газа).

Механизм вращения лопастей *ротационного газового счетчика* аналогичен механизму вращения овальных шестерен для счетчиков количества жидкости. Валы каждой из лопастей вне корпуса имеют на конце шестерни, находящиеся в зацеплении, благодаря чему движение одной лопасти передается другой.

Благодаря тщательной обработке внутренней поверхности корпуса и трущихся поверхностей лопастей, а также точной их подгонке утечки газа в таких счетчиках минимальны. По сравнению с остальными газовыми счетчиками ротационные имеют меньшие габариты при одних и тех же пределах измерения.

3.7.6. Вихревые расходомеры

Действие этих расходомеров основано на явлении возникновения вихрей при встрече потока с телом необтекаемой формы 1 (рис. 3.36).

При установке стержнеобразного тела (вихреобразователя) в потоке рабочей среды внутри трубопровода ниже по течению поочередно с обеих сторон начинают генерироваться вихри. Это явление известно как вихри Кармана.

При работе расходомера вихри 2...5 отрываются поочередно от противоположных сторон тела, расположенного поперек движения потока. Частота отрыва вихрей прямо пропорциональна скорости потока, то есть его объемному расходу Q . В месте завихрения скорость потока увеличивается, давление p уменьшается. Поэтому частоту образования вихрей можно измерять, например, манометром, электрический выходной сигнал которого подают на частотомер.

3.8. Измерение расхода с помощью расходомеров скоростного напора

Цель: ознакомиться с методом измерения расхода с помощью расходомеров скоростного напора.

Теория и методы расчета

Расходомеры скоростного напора (напорные трубки) основаны на зависимости динамического напора от скорости потока измеряемого вещества. Напорные трубки разделяются на три типа в зависимости от конструкции ее конца: конические, полусферические и полуэллипсоидальные.

Расход определяют:

а) для цилиндрических трубопроводов:

$$Q = 0,01252 \cdot D^2 \sqrt{\frac{h_{cp} (\gamma_p - \gamma_e)}{\gamma_c \cdot 1000}}$$

или

$$G = 0,01252 \cdot D^2 \sqrt{\frac{h_{cp} \cdot \gamma_c \cdot (\gamma_p - \gamma_e)}{1000}};$$

б) для прямоугольных трубопроводов:

$$Q = 0,15948 \cdot F \sqrt{\frac{h_{cp} (\gamma_p - \gamma_e)}{\gamma_c \cdot 1000}}$$

или

$$G = 0,15948 \cdot F \sqrt{\frac{h_{cp} \cdot \gamma_c \cdot (\gamma_p - \gamma_e)}{1000}},$$

где Q – объемный расход в м³/ч;

G – весовой расход в кг/ч;

D – внутренний диаметр трубопровода в мм;

F – проходное сечение в мм²;

γ_c – удельный вес измеряемого вещества при рабочих условиях в кг/м³;

γ_p – удельный вес рабочей жидкости дифманометра при температуре окружающего воздуха в кг/м³;

$\gamma_в$ – удельный вес измеряемого вещества над рабочей жидкостью дифманометра в кг/м³;

h_{cp} – средний динамический напор в мм столба рабочей жидкости дифманометра, который равен

$$\sqrt{h_{cp}} = \frac{1}{n} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} + \dots + \sqrt{h_n})$$

где $h_1, h_2, \dots, h_n$ – динамические напоры, измеренные в различных точках сечения трубопровода;

n – число точек измерения.

Достоверность измерения расхода зависит от правильности нахождения h_{cp} .

При турбулентном потоке (прямой участок трубопровода не менее $50D$) место средней скорости потока будет на расстоянии $0,762 \frac{D}{2}$ от центра круглого трубопровода или на $-0,238 \frac{D}{2}$ от её края (при этих условиях $v_{cp}/v = 1 \pm 0,005$ – отношение средней скорости по всему сечению трубопровода к скорости в месте установки трубки).

Для приближенного определения расхода допустимо брать одно измерение максимального динамического напора h_{max} вместо h_{cp} , но в вышеуказанные расчетные формулы следует ввести коэффициент k , зависящий от числа Рейнольдса (табл. 2).

Таблица 2

Поправочный коэффициент h_{max} в зависимости от числа Рейнольдса

Re	k
4000	0,7
10000	0,78
100000	0,83
1000000 и более	0,87

Для малых чисел Re , а также при ламинарном потоке месторасположение $v_{cp}/v = 1$ будет на расстоянии $0,707 \frac{D}{2}$ от центра круглого трубопровода.

При условиях, когда прямой участок менее $50D$, расход необходимо определять экспериментальным способом, для чего сечения трубы условно разделяют на ряд кольцевых участков (полей скорости), в которых изме-

ряют динамический напор. Для трубопроводов диаметром 150...300 мм рекомендуют число участков брать не менее трех, а для трубопроводов диаметром 300...900 мм – не менее пяти. При пяти кольцевых участках десять точек измерения будут отстоять от внутренней поверхности трубы на расстоянии, показанном на рис. 3.37, а.

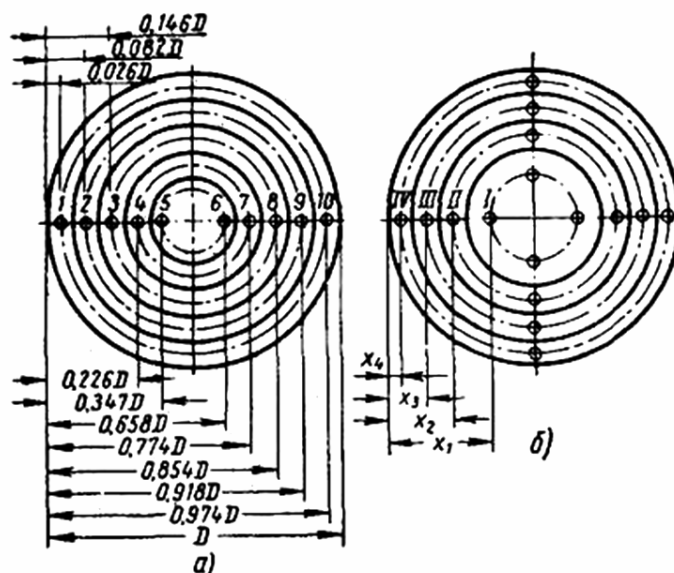


Рис. 3.37. Месторасположение точек измерения динамического напора:
а) при десяти точках измерения в круглом трубопроводе;
б) разбивка сечения на равные участки круглого трубопровода

В общем случае расстояние x от стенки трубопровода до каждой из точек измерения определяется (рис. 3.37, б) по формуле

$$x_n = \frac{D}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right),$$

где D – диаметр трубопровода в мм;
 n – номер точки, считая от центра трубопровода;
 N – выбранное количество кольцевых участков.

3.9. Методы и средства для определения состава и физико-химических свойств вещества

Средства измерений, предназначенные для количественного определения состава и концентрации газов, называют *газоанализаторами*. Эти приборы широко применяют для контроля процесса горения в топках котлов, определения содержания водорода в системе охлаждения обмоток турбогенераторов, анализа газовых технологических смесей, для контроля за вредными выбросами продуктов сгорания в атмосферу.

Существуют автоматические и переносные газоанализаторы. Автоматические газоанализаторы выполняют в виде показывающих и самопишущих приборов с дистанционной передачей показаний на блочный щит управления и применяют для непрерывного анализа газов в промышленных установках. Переносные газоанализаторы, отличающиеся большей точностью измерений, используют при испытаниях и наладке котлоагрегатов, а также при поверке автоматических газоанализаторов. Шкалы газоанализаторов градуируются в процентах объемного содержания отдельных компонентов в исследуемой газовой смеси. Воспроизведение единиц измерения концентрации компонентов газовых смесей осуществляется на основе эталонных газовых смесей. Большинство промышленных газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного из компонентов газовой смеси, при этом используется то или иное физико-химическое свойство газа, отличающее его от других газов в смеси. Газоанализаторы в отличие от обычных измерительных приборов представляют собой более сложные средства измерений, относящиеся к измерительной установке. Они содержат кроме измерительного преобразователя ряд вспомогательных устройств, обеспечивающих отбор, подготовку и транспортирование пробы газа в прибор.

В современных газоанализаторах используются самые различные физико-химические методы анализа, основанные на новейших достижениях различных отраслей науки и техники.

3.9.1. Электрические методы анализа газов

Большое распространение получили электрические методы анализа газов, которые в зависимости от используемых физико-химических явлений и свойств газов подразделяются на следующие группы:

- 1) электрические (кондуктометрический, кулонометрический, потенциометрический);
- 2) электрофизические (тепловой, магнитный, емкостный);
- 3) ионизационные;
- 4) спектрометрические.

Действие электрических газоанализаторов основано на поглощении отдельных компонентов исследуемой смеси газов при пропускании ее через определенные реактивы и образовании электролита. Электрическая проводимость электролита возрастает по мере повышения концентрации растворенных в нем веществ.

Кондуктометрический метод определения концентрации газов основан на измерении электрической проводимости раствора, с которым реагирует определяемый компонент анализируемого газа.

Кондуктометрический газоанализатор (рис. 3.38) состоит из диф-

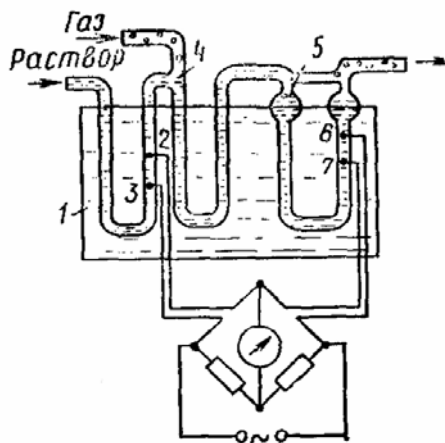


Рис. 3.38. Кондуктометрический газоанализатор

ференциального электролитического преобразователя, помещенного для выравнивания температур плеч в масляный термостат 1, и мостовой измерительной цепи. Электрическая проводимость раствора между электродами 2 и 3 постоянная, а между электродами 6 и 7 она зависит от концентрации определенного компонента газа, который поглощается раствором в змеевике 4. Непрореагировавшая часть газа отделяется от жидкости в газоотделителе 5 и удаляется вместе с раствором.

Кондуктометрические газоанализаторы используют для измерения малых концентраций широкого класса газов (CO_2 , SO_2 , H_2S , NH_3 , H_2 и др.).

Принцип действия **кулонометрических газоанализаторов** основан на связывании выделившегося при электролизе вещества с анализируемым газом так, что мерой концентрации газа является электрический ток. Кулонометрические газоанализаторы служат для измерения содержания микроконцентраций SO_2 , H_2S и других.

3.9.2. Тепловой метод измерения

Тепловые методы основаны на измерении различной теплопроводности компонентов, входящих в анализируемую газовую смесь. Приборы, основанные на этом методе измерения – катарометры, особенно пригодны для анализа содержания газов H_2 , He , CO_2 , SO_2 , так как они значительно отличаются по теплопроводности от других газов, а также для измерения вакуума, при определении абсолютной концентрации газов безотносительно к их составу.

В качестве чувствительных элементов в катарометрах (рис. 3.39) используются нагреваемые электрическим током I платиновые или полупроводниковые терморезисторы 1. При изменении концентрации измеряемого компонента газовой смеси, пропускаемой через камеру 2, где помещен терморезистор, изменяются теплоотдача и температура терморезистора,

что вызывает изменение его электрического сопротивления. Измерительная цепь таких газоанализаторов обычно представляет собой автоматическую мостовую цепь.

Выпускается несколько типов тепловых газоанализаторов. Газоанализаторы типа ТП применяются для измерения концентрации CO_2 или H_2 в пределах 0...10; 0...20; 0...30; 20...60; 40...80; 8...100% объемных в многокомпонентных смесях газов. Основная погрешность газоанализаторов $\pm 2,5\%$, запаздывание 1...2 мин.

Избирательность газоанализаторов может быть повышена, если применять метод сравнения теплопроводности анализируемой смеси с теплопроводностью сравнительной газовой смеси с определенными свойствами. Этот метод применен, в частности, в газоанализаторах типа ТКГ.

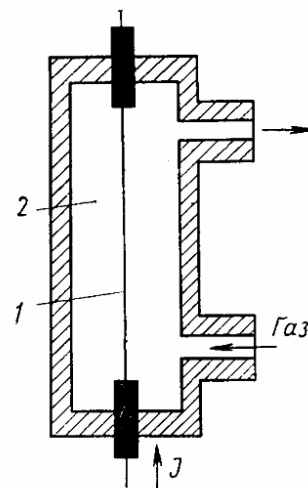


Рис. 3.39. Датчик газоанализатора: 1 – терморезисторы; 2 – камера

3.9.3. Магнитный метод измерения

Магнитный метод широко используется для измерения концентрации кислорода в газовых средах. Рассмотрим приборы, в основу которых положен данный метод измерения.

Принцип действия терромагнитных газоанализаторов основан на различной магнитной восприимчивости газов. Наибольшей способностью к намагничиванию в магнитном поле среди газовых продуктов сгорания обладает кислород, относящийся к парамагнитам. С повышением температуры магнитная восприимчивость у кислорода снижается. Эта особенность используется в терромагнитных газоанализаторах – *кислородомерах*.

Существует несколько способов измерения магнитной восприимчивости газовой смеси, которая определяется содержанием в ней кислорода. В промышленных газоанализаторах используется явление терромагнитной конвекции, которое можно понять при рассмотрении устройства чувствительного элемента магнитного кислородомера типа МН (рис. 3.40).

Поток кислородсодержащего газа постоянного давления и расхода (контролируется по ротаметру) подается в кольцевую камеру, где установлена стеклянная трубка с двумя чувствительными платиновыми термометрами сопротивления $R1$ и $R2$, нагреваемыми электрическим током до температуры более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вокруг термометра сопротивления $R1$ размещены

полюсы постоянного магнита. Под действием магнитного поля часть газового потока втягивается в трубку, в которой он охлаждает термометр $R1$; при этом повышается температура и снижается магнитная восприимчивость газового потока. Холодные слои потока, идущие следом, выталкивают нагретые, создавая магнитную конвекцию газового потока. Чем больше содержание кислорода в газе, тем сильнее охлаждается термометр $R1$ и тем больше изменяется его сопротивление. В связи с тем, что термометр $R2$ омывает уже горячий газ, охлаждения его не происходит и сопротивление не меняется.

Рассмотренный принцип действия лежит в основе измерительной схемы газоанализатора МН по кислороду.

Для исключения погрешностей от влияния не измеряемых компонентов, изменения температуры и напряжения питания, в магнитных кислородомерах (типа МН, Щ-МК) используют компенсационно-мостовые измерительные цепи, состоящие из измерительного и сравнительного мостов. Через чувствительные элементы измерительного моста пропускается анализируемая газовая смесь, через элементы сравнительного моста – газовая смесь известной концентрации (например, воздух).

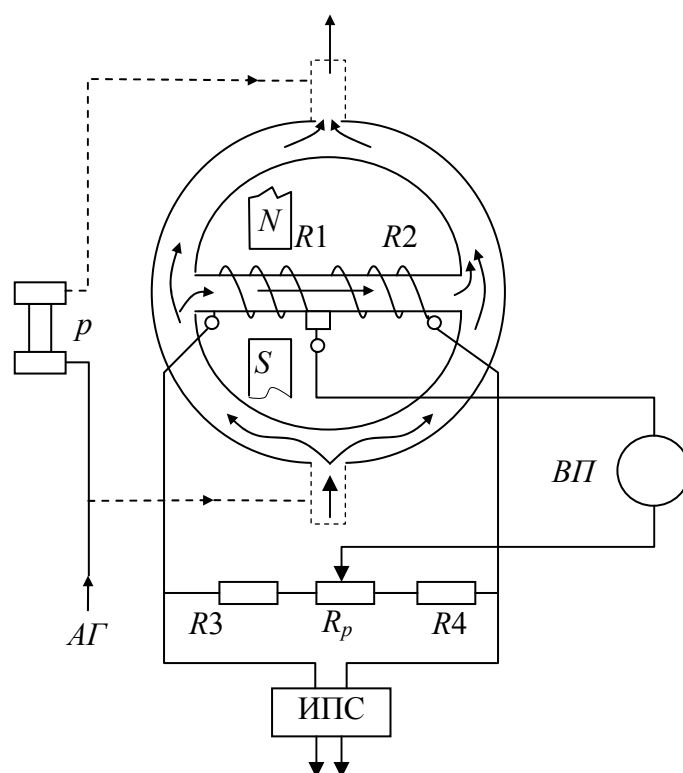


Рис. 3.40. Устройство чувствительного элемента магнитного кислородомера:

P – ротаметр; AG – анализируемый газ; $ВП$ – вторичный прибор;

$ИПС$ – источник стабилизированного напряжения

Магнитные кислородомеры применяются для измерения относительно больших концентраций кислорода (пределы измерений от 0...1 до 0...100 % объемных). Основная погрешность – 0,2...5 %. Время запаздывания – 10...90 с.

3.9.4. Химические газоанализаторы

Большое распространение для анализа дымовых газов получили переносные химические газоанализаторы периодического действия, которые могут быть индикаторами и сигнализаторами утечки газов. К приборам этой группы относят объемные электрохимические газоанализаторы. При этом содержание искомого компонента определяют по изменению объема или давления газовой смеси в результате ее сжигания избирательного поглощения или химической реакции. Этими приборами можно измерить концентрацию в газовой смеси следующих элементов: CO_2 , SO_2 , H_2S , H_2 , CO , O_2 . Содержание CO_2 и SO_2 определяют по поглощению их раствором едкого кали, H_2 и CO – щелочным раствором полухлористой меди, O_2 – щелочным раствором пирогаллола, углеводородов – бромной водой. Погрешность рассматриваемого метода зависит от погрешности измерения объема или давления и стабильности температуры начального и остаточного объема взятой пробы газа.

Рассмотрим принцип действия газоанализатора ГХП-2 (рис. 3.41), предназначенного для измерения CO_2 и O_2 .

Прибор состоит из измерительной бюретки 3, к которой через краны 10 подключены два поглотительных сосуда 5 и 6. Сосуд 6 заполнен раствором едкого кали (для поглощения CO_2), а сосуд 5 – раствором пирогаллола (для поглощения O_2). Поскольку в сосуде 5 кроме кислорода поглощается и диоксид углерода, проба газа сначала поступает в сосуд 6, а затем – в сосуд 5. В бюретке находится жидкостной манометр 4, одна трубка которого сообщается с атмосферой. Манометр служит для измерения давления газа после поглощения определяемого компонента. Пробу газа с помощью груши 8 отбирают в сосуд 2 через фильтр 9 (для очистки газа). При опускании напорного сосуда 7 бюретка заполняется газом, избыток которого удаляют через трубку 1. При подъеме сосуда 7 его жидкость достигает конца трубки 1, в результате чего перекрывается вывод газа в атмосферу (при этом отсекается проба газа 50 см³). Далее один из кранов 10 переключают в другое положение, при котором анализируемый газ сначала поступает в сосуд 6, а затем в сосуд 5. После прохождения газа через каждый сосуд определяют изменение его объема, по которому судят о

концентрации измеряемого компонента газа. Недостатками электрохимических газоанализаторов являются периодичность анализа, необходимость частой замены реактивов, сложность создания автоматического прибора.

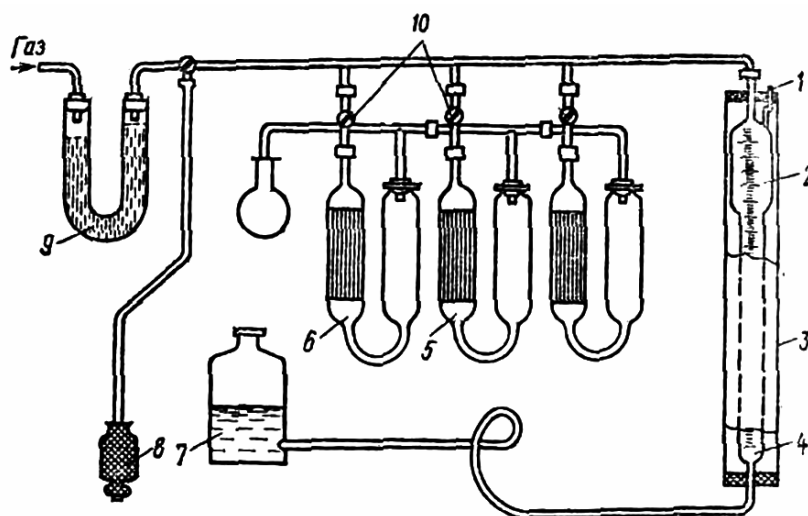


Рис. 3.41. Схема химического переносного газоанализатора ГПХ:
1 – трубка; 2, 5, 6, 7 – сосуды; 3 – бюретка,
4 – манометр; 8 – груша; 9 – фильтр; 10 – краны

Газовая хроматография основана на двух процессах: адсорбционном разделении газовых смесей на отдельные компоненты и последующем (последовательном) определении их содержания в смеси газа.

Хроматографические приборы (хроматографы) предназначены для анализа газовых смесей. Хроматографы являются приборами периодического действия, их отличает от других подобных приборов высокая чувствительность, точность и малое время анализа. Рассмотрим схему хроматографического газоанализатора на рис. 3.42, а. В разделительную колонку *РК*, заполненную твердым или жидким сорбентом, непрерывно поступает с постоянной скоростью (регулируется устройством *Уст*) газ-носитель *ГН* измеряемой смеси из баллона *Б*. В теплоэнергетике при определении горючих компонентов в качестве газа-носителя служит воздух, а негорючих – инертные газы (N_2 , Ar). В качестве твердых сорбентов используют активированный уголь. Перед *РК* в поток газа-носителя периодически вводится дозатором *Дз* проба *ПГ* (рис. 3.42, б) исследуемой газовой смеси, содержащая, допустим, компоненты *А*, *В* и *С*. Для каждой колонки, вида газа и детектора *Дт* существует оптимальный объем пробы газа, который снизу определяется чувствительностью *Дт*, а сверху – его разрешающей способностью. В среднем объем пробы от 0,1 до 20 см³.

Таким образом, после разделения каждый компонент вместе с газом-носителем образует бинарную смесь, анализ которой может быть выполнен, описанным методом в детекторе $Дт$. Выходной сигнал $Дт$ подается на самопишущий прибор $СП$, на диаграмме которого появляется кривая в виде горизонтальных пиков различной величины, характеризующих содержание компонентов A, B, C в смеси газов.

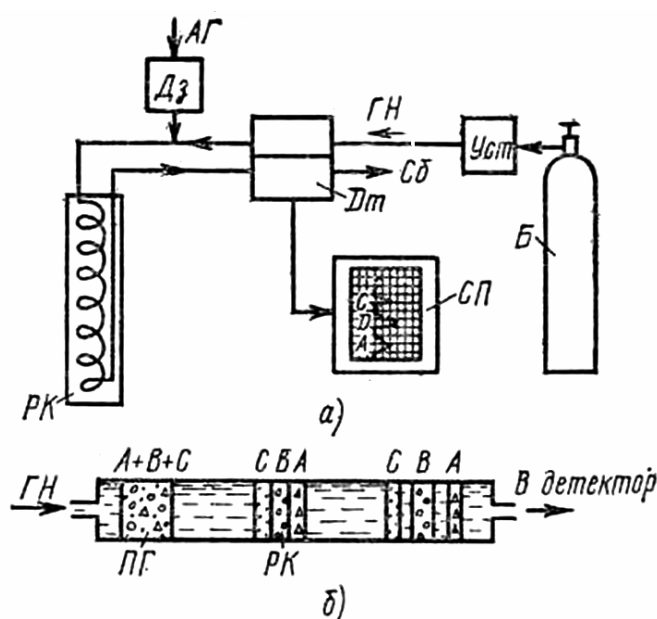


Рис. 3.42: а) схема хроматографического газоанализатора;
 б) разделение смеси газов в разделительной колонке;
 Сб – сброс; АГ – анализируемый газ

В теплоэнергетике для анализа дымовых газов применяют переносной хроматограф «Газохром 3191» который служит для определения концентрации O_2, N_2, NO, H_2, CO и углеводородов с точностью до $+ 5 \%$. Продолжительность полного анализа проб дымового газа составляет 10 минут.

3.10. Методы и средства измерения уровня

Измерение уровня – одна из самых распространенных задач в системе контроля. Измерение уровня не всегда возможно визуальным способом.

Выбор метода контроля уровня зависит от объекта контроля – открытого или закрытого (под давлением или разрежением) резервуара – и от физико-химических свойств среды. Устройства для измерения уровня жидкости называют *уровнемерами*.

Уровень измеряется линейными мерами длины: метрами, сантиметрами и миллиметрами.

Все приборы измерения уровня можно разделить на две группы: приборы следящего уровня и сигнализаторы уровня.

Приборы следящего уровня (уровнемеры) постоянно измеряют уровень. Эти приборы показывают уровень в емкости по всей высоте диапазона измерения. *Сигнализаторы* уровня контролируют только отдельные точки стояния уровня.

В некоторые модификации уровнемеров встраивают устройства для сигнализации контрольных точек уровня в емкости.

3.10.1. Измерение уровня с помощью поплавкового уровнемера

Эти уровнемеры получили широкое распространение благодаря простоте устройства. В этих приборах чувствительным элементом является поплавок, плавающий на поверхности жидкости и перемещающийся по вертикали вместе с изменением уровня. Масса поплавка уравнивается противовесом. Вертикальное перемещение поплавка приводит в движение передаточный механизм, стрелка которого показывает на шкале уровень жидкости в резервуаре.

Для дистанционной передачи показаний и сигнализации крайних положений уровня к корпусу резервуара крепится дистанционная потенциометрическая установка, в которой при перемещении поплавка изменяется положение подвижного контакта реостата, включенного как потенциометр.

В качестве примера рассмотрим принцип действия и конструкцию прибора РП-1065, который осуществляет непрерывный контроль изменения уровня жидкости в открытом резервуаре с сигнализацией заданных предельных положений уровня (рис. 3.43). Уровень состоит из поплавка 1 и противовеса 3. Переключение контактов предельного положения уровней происходит с помощью коромысла 2, на которое воздействуют укрепленные на тросе упоры. Прибор выпускается в двух модификациях: РП-1065-0 в качестве реле двух положений уровня и РП-1065-1 для непрерывного контроля уровня. Во втором случае, кроме указанных на рис. 3.42 компонентов, в комплект входит прибор сельсинного типа со шкалой и стрелкой, указывающей изменение уровня. Шкала может градуироваться в пределах от 0 до 6 м.

Разработаны уровнемеры, поплавки которых имеют магниты. При перемещении поплавка магниты переключают герметизированные магнитоуправляемые контакты, которые разрывают или замыкают цепи управления и сигнализации.

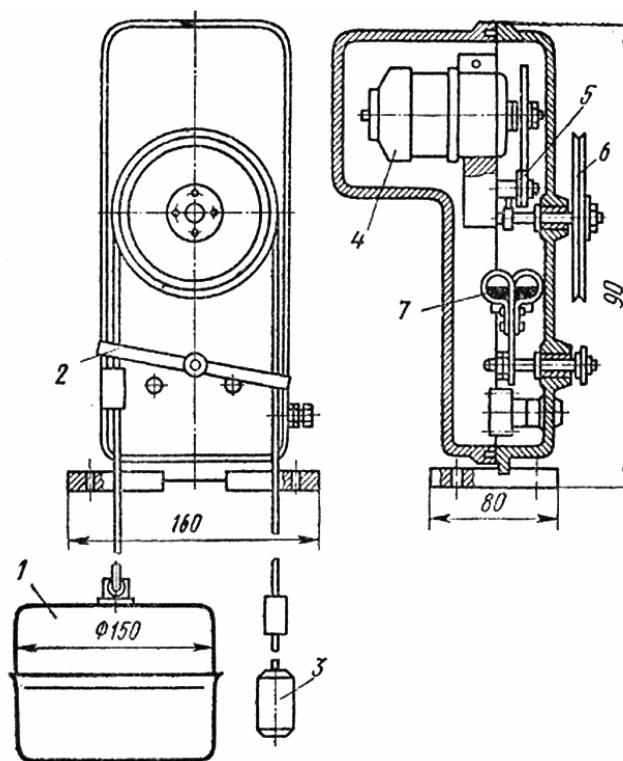


Рис. 3.43. Поплавковый уровнемер РП-1065: 1 – поплавок;
2 – коромысло; 3 – противовес; 4 – сельсин-датчик;
5 – механическая передача; 6 – шкив; 7 – ртутные контакты

Также выпускается поплавковое сельсинное устройство для непрерывного измерения практически любых изменений уровня жидкости в открытых резервуарах. Устройство состоит из датчика и двух видов приемников. Путем комбинации этих приборов можно измерять уровень, разность уровней, два различных уровня и напор, создаваемых их разностью.

3.10.2. Измерение уровня с помощью гидростатических уровнемеров

Гидростатический способ измерения уровня основан на том, что в жидкости существует гидростатическое давление, пропорциональное глубине, то есть расстоянию от поверхности жидкости. Поэтому для измерения уровня гидростатическим способом могут быть использованы приборы для измерения давления или перепада давлений. В качестве таких приборов обычно применяют дифманометры.

Рассмотрим схему измерения уровня жидкости с помощью дифманометра. В данной схеме плюсовой сосуд (находящийся под большим давлением) дифманометра присоединяется к днищу закрытого резервуара (рис. 3.44, б), в котором измеряется уровень. К минусовому сосуду дифманометра присоединяется уравнительный сосуд, располагаемый таким обра-

зом, чтобы уровень жидкости в нем соответствовал максимальному уровню жидкости в резервуаре.

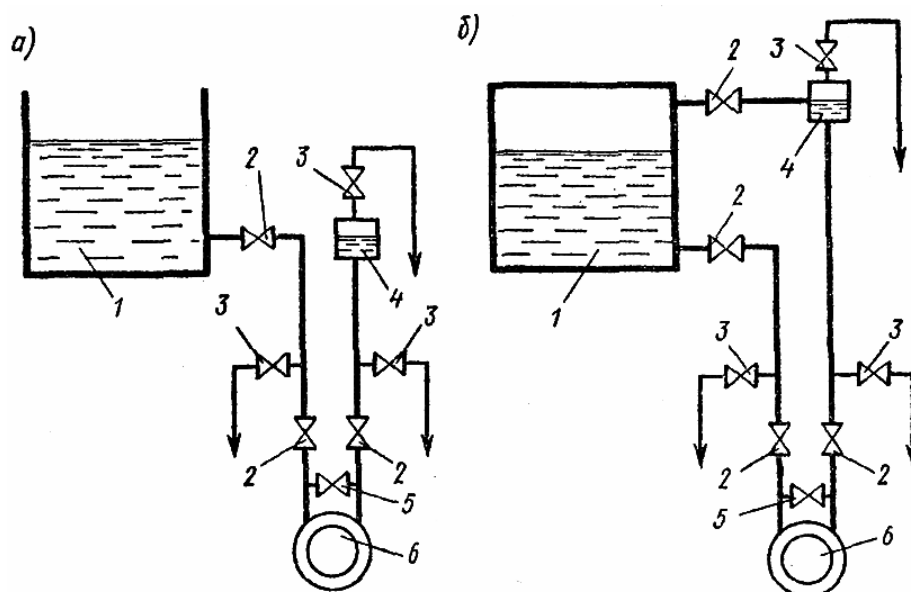


Рис. 3.44. Схема измерения уровня жидкости дифманометром:
а) в открытом резервуаре; б) в закрытом резервуаре; 1 – резервуар;
2 – запорный вентиль; 3 – продувочный вентиль; 4 – уравнивающий сосуд;
5 – уравнивающий вентиль; 6 – дифманометр

Тогда дифманометр будет измерять перепад или разность уровней в резервуаре и уравнительном сосуде. При измерении уровня в открытом резервуаре уравнительный сосуд устанавливается на отметке минимального уровня, как представлено на рис. 3.44, а, верхняя часть сосуда сообщается с атмосферой, предусматриваются сливные краны.

Рассмотрим подробнее получившуюся измерительную систему. Для ее нормального функционирования требуется поддержка набора нескольких функций, сопутствующих измерению разности уровней по разности гидростатических давлений. Для отключения измерительной системы от резервуара предусмотрен запорный вентиль. Для слива жидкости из уравнительного сосуда требуется три продувочных вентилей. Для настройки шкалы требуется уравнительный вентиль. Если уравнительный сосуд подключается к плюсовой стороне дифманометра, то прибор будет измерять снижение уровня жидкости относительно верхнего предела. Когда уравнительный сосуд подключается к минусовой стороне, то прибор измеряет превышение уровня относительно нижнего предела.

Недостатками гидростатического метода измерения уровня являются: необходимость надежной тепловой изоляции уравнительных сосудов

при высоких параметрах жидкости; появление ошибки в измерении уровня при меняющемся давлении среды в резервуаре. Для устранения последнего недостатка усложняют конструкцию уровнемера – вводят устройство коррекции по давлению, температуре, разности плотностей воды и пара.

3.10.3. Измерение уровня с помощью акустических уровнемеров

Принцип действия акустических и ультразвуковых уровнемеров, основан на эффекте отражения ультразвуковых волн от границы раздела жидкости и газа. Уровень жидкости в них зависит от времени прохождения этих волн от источника до приемника.

В одних уровнемерах (акустических) ультразвуковые волны идут через газовую среду, что обуславливает независимость показаний прибора от вида жидкости (однородная, неоднородная, агрессивная), которая может находиться под давлением до 4 МПа и иметь температуру от 5 до 80 °С. В других уровнемерах (ультразвуковых) источник установлен под резервуаром, и ультразвуковые волны распространяются в жидкостной среде. Эти уровнемеры используют только для однородных жидкостей, поэтому они не получили широкого распространения.

Рассмотрим акустический датчик уровня ЭХО-1. Он предназначен для непрерывного автоматического дистанционного контроля и регулирования уровня сред. Принцип работы ультразвукового датчика основан на свойстве ультразвуковых колебаний отражаться от границы раздела сред с различными акустическим сопротивлением (газ-жидкость). Мерой уровня является время распространения ультразвуковых колебаний от источника измерения, расположенного со стороны газа, до плоскости границы раздела и обратно.

Структурная схема акустического уровнемера ЭХО-1 показана на рис. 3.45. В комплект акустического датчика входят акустический преобразователь, электронный блок. Генератор G вырабатывает электрические импульсы с заданной частотой. Под их действием акустический преобразователь $АПр$ распространяет ультразвуковые волны, которые в воздушной среде идут к жидкости, а от нее снова к тому же преобразователю. Отраженные импульсы преобразуются в электрические, усиливаются усилителем $Ус$ и подаются в триггер $Трг$, с помощью которого измеряется время запаздывания отраженного сигнала.

Далее устройство $У1$ преобразует значение времени в унифицированный токовый сигнал. В уровнемере предусмотрено также устройство температурной компенсации $У2$. Уровнемеры ЭХО-1 выпускаются класса точности 2,5 и пределами измерения уровня 0...1000; 0...2000; 0...3000 мм.

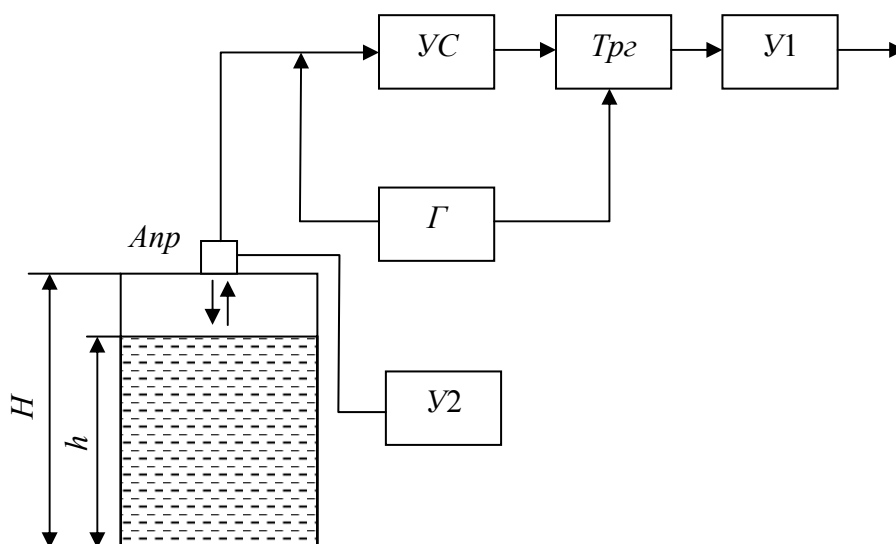


Рис. 3.45. Структурная схема акустического уровнемера ЭХО-1

3.10.4. Измерение уровня с помощью емкостных уровнемеров

Принцип действия емкостных уровнемеров основан на зависимости электрической емкости первичного преобразователя, введенного в жидкость, от ее измеряемого уровня. Емкостные уровнемеры служат для измерения уровня жидкостей с давлением до 6 МПа и температурой от минус 40 °С до + 200 °С. Конструкция уровнемеров зависит от электрической проводимости жидкостей. В случае электропроводных жидкостей (удельное сопротивление $r \leq 10^5 \dots 10^6$ Ом м), электроды первичного преобразователя покрывают изоляцией.

Форма электродов может быть различной, чаще всего используют цилиндрические электроды, занимающие весь объем жидкости и газового пространства. Схема емкостного уровнемера приведена на рис. 3.46.

Первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод 1 (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке 2 (рис. 3.46, а). Стержень вместе с трубкой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости H и от диэлектрической проницаемости ϵ жидкости, которая может изменяться с увеличением ее температуры и изменением состава. На рис. 3.46, б приведена электрическая схема емкостного уровнемера. Измерение электрической емкости первичного преобразователя C_x производится неуравновешенным мостом переменного тока, плечами которого являются индуктивности L_1 и L_2 , емкость C_1 и емкость первичного преобразователя C_x . При изменении уровня изменяется емкость C_x , что приводит к изменению выходного напряжения моста U .

Емкостные уровнемеры могут измерять уровень не только жидкостей, но и твердых сыпучих материалов.

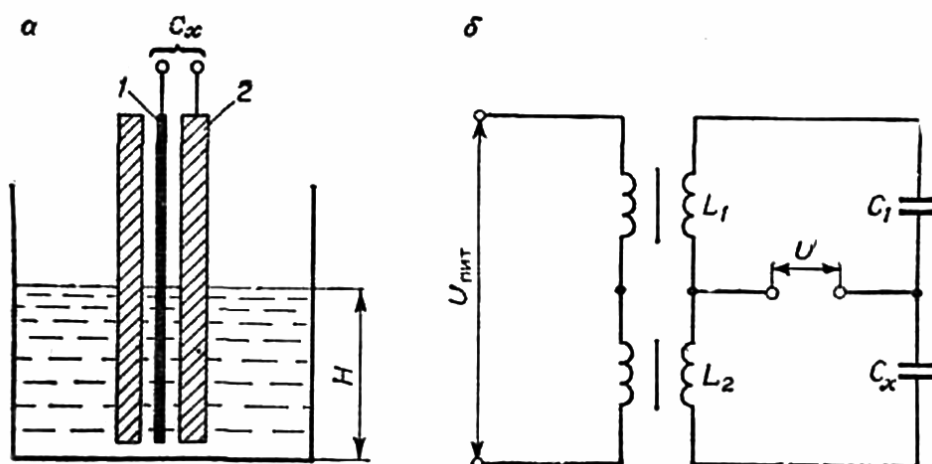


Рис. 3.46. Емкостной уровнемер: а) устройство датчика; б) электрическая схема уровнемера; 1 – электрод; 2 – труба

Большое распространение получили емкостные сигнализаторы уровня. Для повышения чувствительности их электроды устанавливают в горизонтальном положении. В этом случае погрешность измерения не превышает 3 мм.

Диапазон измерения уровнемеров зависит от типа преобразователя и составляет от 1 до 20 м; допускаемая основная погрешность – 2,5 %.

Недостатками емкостных уровнемеров являются невозможность измерения уровня вязких, пленкообразующих, кристаллизирующихся жидкостей, а также высокая чувствительность к изменению диэлектрических свойств жидкости и емкости измерительных проводов.

3.10.5. Измерение уровня с помощью радиолокационных уровнемеров

Радиолокационный способ измерения уровня не требует непосредственного контакта с рабочим веществом и поэтому имеет преимущество использования в среде, где традиционные погружаемые и контактные датчики загрязняются или подвержены коррозии. На точность измерения уровня контролируемой среды не влияют:

- плотность и объем среды;
- многофазность среды;
- температура среды в диапазоне от минус 40 до + 150 °С;
- давление в резервуарах до 10 Бар.

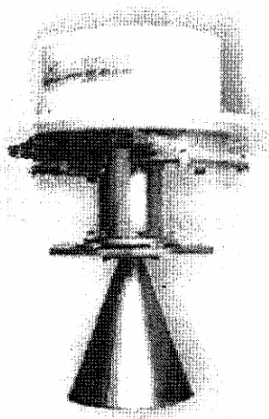


Рис. 3.47. Радиолокационный уровнемер РВР-102

Радиолокационные уровнемеры применяются при работе с турбулентными, вязкими и агрессивными жидкостями, а также с густыми пастами, эмульсиями и суспензиями. Прибор не имеет движущихся частей и достаточно просто монтируется на люках резервуаров.

В качестве примера рассмотрим радиолокационный уровнемер РВР-102, предназначенный для измерения уровня жидких, пастообразных и некоторых сыпучих материалов в закрытых резервуарах (рис. 3.47).

В уровнемере РВР-102 используется непрерывный частотно-модулированный СВЧ-сигнал в уникальном, для такого применения, 3-сантиметровом диапазоне длин электромагнитных волн. Передатчик уровнемера излучает СВЧ-сигналы в направлении рабочего вещества через узконаправленную антенну. В приемнике отраженный сигнал непрерывно сравнивается с излучаемым сигналом. Разница частот между излученным и отраженным от поверхности сигналами, которая образуется благодаря модуляции, пропорциональна расстоянию до поверхности и позволяет определить уровень жидкости. Микропроцессорная обработка информации обеспечивает высокую точность измерений, а ее адаптивность позволяет формировать компьютерно-информационную сеть контроля продукции, независимо от количества контролируемых параметров.

В состав прибора входят:

- блок измерительный (радиолокационный датчик);
- блок управления, контроля и индикации (вторичный преобразователь).

Прибор оборудован узлами защиты электронной аппаратуры от электрических импульсно-волновых перегрузок, вызванных грозовыми разрядами и промышленными наводками.

Преимущества данного уровнемера заключаются в следующем:

- простая установка;
- отсутствие контакта с измеряемой средой;
- передача данных на компьютер оператора;
- широкий температурный диапазон измеряемой среды;
- взрывобезопасность.

Диапазон измерения уровня 1 ... 30 м. Ошибка измерения уровня при расстояниях до 10 метров ± 5 мм, более 10 метров – ± 10 мм; время измерения не более 5 с. Класс взрывобезопасности IExdsIIBT4.

3.11. Измерение уровня неагрессивной жидкости в открытом резервуаре с применением дифманометров

Цель: освоить методику расчета измерения уровня неагрессивной жидкости с применением дифманометров.

Гидростатические системы измерения уровня жидкости при помощи дифманометров основаны на измерении дифманометром перепада давлений, обусловленного разностью высот столбов жидкости в резервуаре и уравнительном сосуде. Уравнительный сосуд и соединительные линии заполняют жидкостью, уровень которой подлежит измерению.

Схема измерения уровня неагрессивной жидкости в открытом резервуаре представлена на рис. 3.48. В этом случае уравнительный сосуд должен быть установлен на высоте наименьшего уровня жидкости в резервуаре. Расчетная схема уровнемера системы измерения представлена на рис. 3.49.

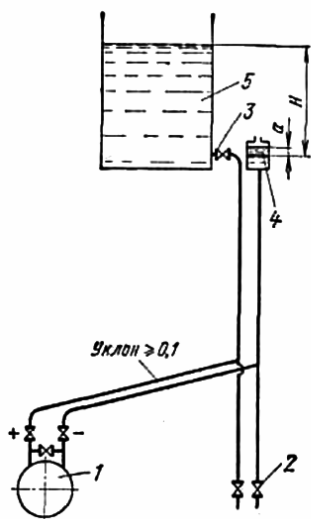


Рис. 3.48. Схема для измерения уровня в открытом резервуаре: 1 – дифманометр; 2 – вентиль слива; 3 – запорный вентиль; 4 – уравнительный сосуд; 5 – резервуар

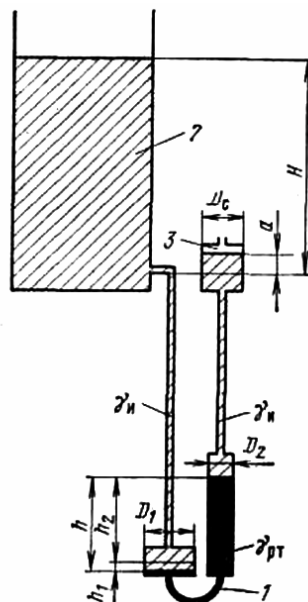


Рис. 3.49. Расчетная схема уровнемера системы измерения: 1 – дифманометр; 2 – резервуар; 3 – уравнительный сосуд

Методика расчета

Найдем зависимость подъема уровня ртути h в поплавковом дифманометре от уровня H измеряемой жидкости при удельном весе измеряемой жидкости γ_H и внутреннем диаметре уравнительного сосуда D_c . Исходя из рис. 3.49, составим уравнение равновесия

$$(H - a)\gamma_H + h\gamma_H = h\gamma_{PT},$$

откуда

$$h = (H - a) \frac{\gamma_{II}}{\gamma_{PT} - \gamma_{II}}, \quad (3.2)$$

где a – изменение уровня жидкости в уравнительном сосуде.

Количество жидкости, вошедшей в плюсовой сосуд, равно количеству, вытесненному из минусового сосуда. С учетом этого можно записать

$$D_1^2 h_1 = D_2^2 h_2 \quad (3.3)$$

или

$$D_1^2 h_1 = D_c^2 a \quad (3.4)$$

Записав (3.3) в виде пропорции

$$\frac{D_1^2 D_2^2}{D_2^2} = \frac{h_1 + h_2}{h_1},$$

получим

$$\frac{h}{h_1} = \frac{D_1^2 + D_2^2}{D_2^2},$$

откуда

$$h_1 = \frac{D_2^2}{D_1^2 + D_2^2} h. \quad (3.5)$$

Из выражения (3.4) находим высоту подъема жидкости в уравнительном сосуде:

$$a = \frac{D_1^2}{D_c^2} h_1.$$

Подставив в полученное выражение значение h_1 из (3.5), получим

$$a = \frac{D_1^2 \cdot D_2^2}{D_c^2 (D_1^2 + D_2^2)} h.$$

Для всех типов дифманометров, включенных с вертикальным цилиндрическим уравнительным сосудом, справедливо следующее соотношение:

$$a_{\text{макс}} = \frac{4V_{\text{макс}}}{\pi D_c^2}, \quad (3.6)$$

где $V_{\text{макс}}$ – перестановочный объем дифманометра (объем жидкости, вытесняемой из плюсового сосуда в минусовый при полном ходе поплавка);

D_c – внутренний диаметр уравнительного сосуда.

Номинальный перепад поплавкового манометра равен $\Delta P_H = h\gamma_{PT}$.
Используя уравнение равновесия (3.2), получим

$$\Delta P_H = (H_{\text{макс}} - a_{\text{макс}}) \frac{\gamma_{II}\gamma_{PT}}{\gamma_{PT} - \gamma_{II}},$$

откуда

$$H_{\text{макс}} = \Delta P_H \frac{\gamma_{PT} - \gamma_{II}}{\gamma_{II}\gamma_{PT}}. \quad (3.7)$$

Так как пружинные дифманометры имеют весьма малый перестановочный объем и перемещение ($h \approx 0$, $a_{\text{макс}} \approx 0$), то в этом случае с достаточной для практических расчетов точностью можно принять, что номинальный перепад компенсируется только высотой столба измеряемой жидкости:

$$\Delta P_H = H_{\text{макс}}\gamma_{II},$$

откуда

$$H_{\text{макс}} = \frac{\Delta P_H}{\gamma_{II}}$$

Для лучшего усвоения методики расчета рассмотрим следующий пример решения задачи.

Задача. Уровень воды в открытом резервуаре измеряется поплавковым дифманометром по схеме рис. 3.46. Зная, что $V_{\text{макс}} = 168000 \text{ мм}^3$, $\gamma_{II} = 998 \text{ кгс/м}^3$, $\gamma_{PT} = 13600 \text{ кгс/м}^3$, $\Delta P_H = 2500 \text{ кгс/м}^2$. Определить верхний предел измерения уровня $H_{\text{макс}}$, если $D_c = 100 \text{ мм}$.

Методика расчета:

1. Определяем по формуле (3.6) наибольший подъем жидкости в уравнительном сосуде:

$$a_{\text{макс}} = \frac{4 \cdot 168000}{3,14 \cdot 100^2} = 21 \text{ мм}.$$

2. Определяем по формуле (3.7) верхний предел измерения уровня:

$$H_{\text{макс}} = 2500 \frac{13600 - 998}{13600 \cdot 998} + 0,021 = 2,34 \text{ м}.$$

Глава 4. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ

4.1. Усилительно-преобразовательные устройства

В системе автоматического регулирования назначение усилителя состоит в том, чтобы сигнал, поступивший от датчика, усилить и в некоторых случаях преобразовать в командный сигнал, то есть сигнал, достаточный по мощности для привода в движение регулирующего органа. Следовательно, задача усилителя заключается в изменении притока энергии из внешнего источника в исполнительный механизм с целью необходимого перемещения регулирующего органа.

Усилители различают:

- по виду энергоносителя,
- выходной мощности,
- коэффициенту усиления (преобразования),
- статической характеристике (линейные и нелинейные).

В зависимости от **вида энергии источника** питания усилители разделяют на *электрические, пневматические, гидравлические*. Электрические усилители, в свою очередь, делятся в зависимости от **вида усилительного элемента** на *электронные* или *ламповые, полупроводниковые* и *магнитные*.

Коэффициентом усиления K_N называется отношение величины сигнала, снимаемого с выхода усилителя, к величине сигнала, подаваемого на вход. В зависимости от устройства и принципа действия усилителя коэффициент усиления K_N может колебаться от 10 до 10^8 и более, причем верхний предел характерен для электронных усилителей.

Выходные мощности усилителей колеблются от долей ватт до десятка и более киловатт. Электрические усилители имеют ограниченную мощность, связанную с резким возрастанием габаритов исполнительных устройств.

Линейным называется усилитель, у которого выходная величина пропорциональна входной на всем интервале регулирования. Нелинейность усилителя является существенным его недостатком. Электронные и магнитные усилители с достаточной для инженерной практики точностью можно считать безынерционными.

К усилителям предъявляются следующие требования:

- должны иметь требуемый коэффициент усиления;
- характеристика должна быть по возможности близка к линейной;
- должны иметь достаточную чувствительность;
- запаздывающее действие должно сводиться к минимуму.

4.1.1. Гидравлические, пневматические усилители

В гидравлических регуляторах наиболее часто применяют три основных вида усилителей: золотниковые, струйные и устройство типа сопло-заслонка.

В гидравлических усилителях в качестве энергоносителей используются жидкости, не меняющие своих физико-химических свойств в процессе эксплуатации: вода, минеральные масла (трансформаторное, веретенное В-20, ГМЦ-2, велосит, турбинное), керосин, спирто-глицериновые смеси, синтетические – полисилоксан, силиконовые масла. Жидкие энергоносители должны обладать неизменной вязкостью в широком температурном интервале, низкой температурой замерзания, а также пожаро- и взрывобезопасностью, неагрессивностью по отношению к металлам и материалам уплотнений, низкой стоимостью.

Рассмотрим *золотниковые гидроусилители*. Золотниковые гидроусилители представляют собой миниатюрные устройства типа поршень – цилиндр, отличающиеся простотой конструкции и высокой надежностью. Золотник может быть *отсечного* типа и *проточного* (рис. 4.1, *а* и *б*). В обоих случаях он состоит из гильзы 4 с рядом отверстий, внутри которой передвигается плунжер 3 с буртиками 2, изменяющий направление движения жидкости от источника энергии (насоса 6). Движение плунжера осуществляется под воздействием x датчика, которое подлежит усилению и преобразованию. При отсутствии воздействия плунжер находится в нейтральном положении: отверстия перекрыты, жидкость остается в центральной полости. Наличие сдвоенных буртиков позволяет разгрузить устройство от давления энергоносителя; равнодействующая давления будет равна нулю, плунжер легко перемещается от незначительного усилия датчика.

При перемещении плунжера вниз открываются напорные окна H , жидкость поступает в напорную полость исполнительного устройства $ИУ$, а из другой полости уходит через сливные отверстия C .

Скорость перемещения поршня зависит от степени открытия напорных отверстий, причем закономерность ее изменения может быть задана профилированием – приданием соответствующей формы (круглой, овальной, треугольной и т. п.) отверстиям. В отсечном золотнике при нейтральном положении плунжера жидкость через золотник не проходит, а в проточном – непрерывно циркулирует. В зависимости от положения плунжера меняется расход энергоносителя (до минимума), и поршень сервомотора, перемещаясь под его давлением (ход вниз) либо под действием возвратной пружины, выталкивает жидкость на слив (ход вверх).

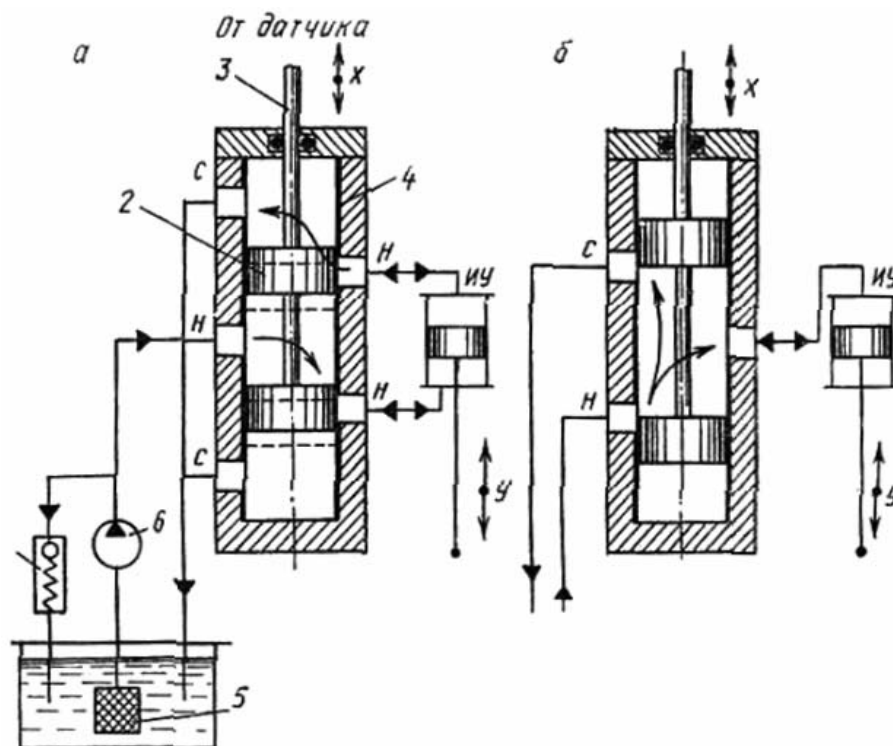


Рис. 4.1. Золотниковый гидроусилитель:
 а) отсечного типа; б) проточного вида;
 1 – редукционный клапан; 2 – буртики; 3 – плунжер;
 4 – гильза; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – насос

Работа *гидроусилителя со струйной трубкой* основана на принципе преобразования динамического давления струи рабочей жидкости, вытекающей из сопла трубки 2, в статическое давление в приемных каналах диффузорной формы 3 (рис. 4.2). Трубка поворачивается в шарнире O под действием усилия от датчика 1, направляя струю в соответствующий канал, соединенный с полостью сервомотора.

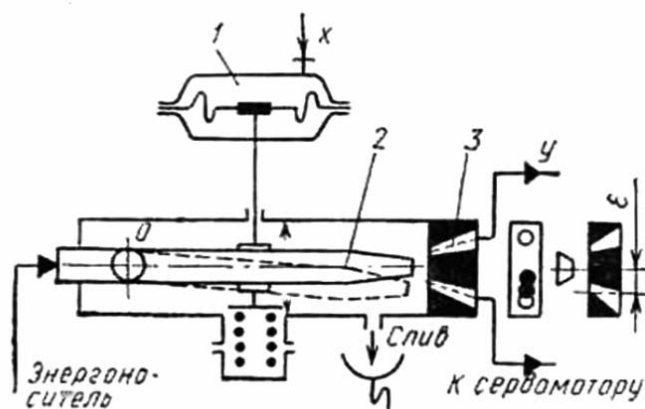


Рис. 4.2. Гидроусилитель со струйной трубкой:
 1 – датчик; 2 – трубка; 3 – канал

Гидроусилитель в виде дросселя переменного сечения (усилитель типа сопло – заслонка) получил широкое распространение в системах ТГВ (рис. 4.3). Устройство состоит из дросселей постоянного и переменного сопротивлений 1, меняющихся при смещении заслонки 3 относительно сопла 2. При изменении положения заслонки давление увеличивается, и жидкость подается под поршень сервомотора. С отходом заслонки от сопла увеличивается слив жидкости, давление в магистрали падает, и сервомотор под действием пружины осуществляет обратный ход. Отличительной особенностью усилителей этого типа является наличие только одной магистрали, соединяющей источник энергии с сервомотором.

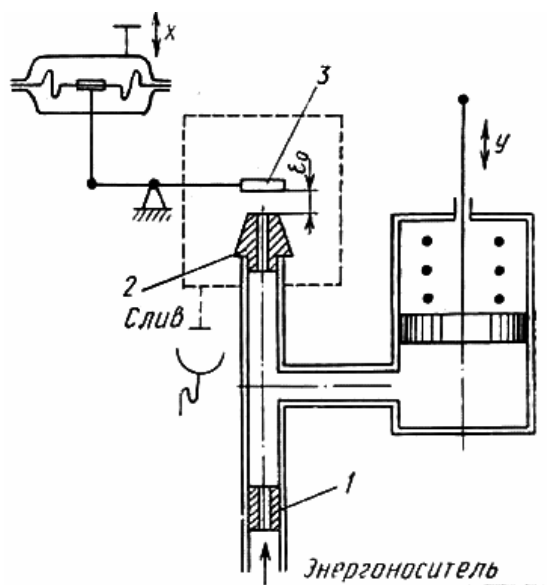


Рис. 4.3. Гидроусилитель в виде дросселя переменного сечения: 1 – дроссели переменного и постоянного сопротивлений; 2 – сопло; 3 – заслонка

Особенности использования воздуха и других газов в качестве энергоносителей – возможность их сжатия, малые плотность и давление (из-за нагрева и взрывоопасности), трение без смазочного материала в механизмах – накладывают свой отпечаток на устройство *пневмоусилителей*.

В пневмоусилителях наиболее часто применяется усилитель типа сопло – заслонка, принцип работы которого был рассмотрен ранее в материале о гидроусилителе в виде дросселя переменного сечения.

В пневмоусилителях других видов обычно используются следующие конструктивные элементы: пневмосопротивления, мембраны (одиночные и собранные в пакеты) и пневмокамеры.

Пневмоусилители присоединяют к автономному источнику энергии, чаще всего к компрессорной установке, или к имеющейся магистрали сжатого воздуха, или другого газа, в том числе и идущего на газоснабжение. Наиболее распространенным типом компрессора является поршневой. В состав установки обязательно входят фильтры, водомаслоотделитель, адсорбер для осушения воздуха и стабилизаторы давления.

4.1.2 Электрические усилители

Электрический усилитель повышает значения напряжения, тока или мощности. Чувствительностью усилителя S называют входной сигнал x_0 , при котором выходной сигнал достигает номинального значения:

$$S = x_0 / K ,$$

где K – коэффициент усиления или преобразования. Для усиления электрических сигналов, идущих от датчиков, применяют магнитные усилители.

Принцип действия магнитного усилителя основан на свойстве ферромагнитных материалов уменьшать динамическую магнитную проницаемость магнитопровода (сердечника) для переменного тока при подмагничивании постоянным током. При этом снижается индуктивность обмоток L и увеличивается рабочий ток:

$$I = U / \sqrt{(\omega L)^2 + R_n^2} .$$

На рис. 4.4 показаны схема однотактного усилителя с тороидальным магнитопроводом (могут быть П- и Ш-образные) с последовательным включением нагрузки и его статическая характеристика с зависимостью $L = f(x)$. Характеристики на рабочем участке близки к линейным (I_x – ток холостого хода) и имеют такую же форму во втором квадранте, то есть эффект усиления не зависит от полярности сигнала.

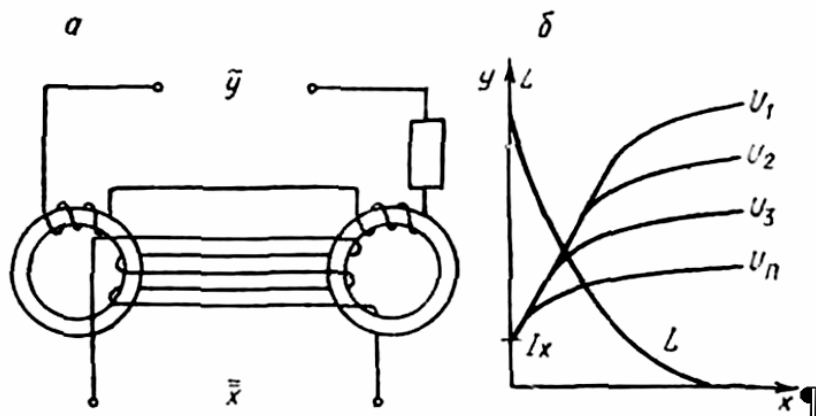


Рис. 4.4. а) схема однотактного усилителя с тороидальным магнитопроводом;
б) статическая характеристика усилителя

К достоинствам магнитных усилителей следует отнести высокие надежность, кпд, простоту обслуживания, взрыво- и пожаростойкость. Основной недостаток – сравнительно большая инерционность, поэтому во многих случаях целесообразна комбинация магнитного усилителя с другими.

4.1.3. Реле

В ряде случаев автоматическое управление может осуществляться путем скачкообразного изменения управляемой величины при определенных значениях управляющей величины. Такое прерывистое воздействие на процесс называется *релейным управлением*, а используемые для этой цели устройства называются *реле*.

Реле обычно состоят из трех основных органов:

- *воспринимающего* (чувствительного), который воспринимает управляющее воздействие и преобразует его в воздействие на промежуточный орган;
- *промежуточного*, который при достижении управляющим воздействием заданной величины передает это воздействие исполнительному органу;
- *исполнительного*, осуществляющего скачкообразное изменение управляемой величины.

У реле, предназначенных для управления работой электрических цепей, исполнительным органом служат контакты; существуют также и бесконтактные (электронные, магнитные) реле.

Классификация реле. Реле можно классифицировать по ряду признаков. В зависимости от рода воспринимаемых физических явлений их делят на *электрические* и *неэлектрические* (тепловые, механические, оптические, акустические и другие).

По принципу действия электрические реле делят на *электромагнитные* (нейтральные и поляризованные), *магнитоэлектрические*, *электронные*, *ионные*, *индукционные*. **По параметру**, на который реагирует, воспринимающий орган электрические реле делят на реле тока, напряжения, мощности, частоты, сдвига фаз.

Тепловые реле делятся на реле с линейным расширением, биметаллические и реле с плавлением.

Механические реле по **воспринимаемому параметру** делят на реле силы, перемещения, скорости, ускорения, частоты.

По назначению различают:

- *пусковые реле* (контакторы, магнитные пускатели); реле, включающие и выключающие различные агрегаты с помощью кнопок, расположенных на пульте управления;
- *максимальные*, отключающие контролируемый участок электрической цепи, когда ток, напряжение, температура, давление или другой, проверяемый параметр, станут больше определенного значения;

- *минимальные*, отключающие контролируемый участок электрической цепи, когда напряжение, ток, температура, давление станут меньше определенного значения;

- *промежуточные*, которые служат для изменения воздействующего импульса, когда мощность контактов первичного реле недостаточна или для размножения воздействующего импульса, когда в нем не хватает контактов;

- *реле времени*, срабатывающее через определенное время после запуска, обеспечивая тем самым необходимую выдержку при включении различных электрических цепей.

Реле также можно классифицировать по мощности тока управления, времени срабатывания и другим признакам.

Все реле, у которых контактные пары являются исполнительным органом, называются контактными. Однако в настоящее время в автоматике получают распространение и считаются перспективными бесконтактные реле.

Наиболее широкое применение в автоматических устройствах имеют электромагнитные реле. *Электромагнитным* называют реле, у которого в качестве воспринимающего органа используется электромагнит с обмоткой управления. Принцип действия его основан на притяжении стального якоря к сердечнику электромагнита, по обмотке которого протекает электрический ток; они могут быть нейтральными и поляризованными.

В последнее время в устройствах автоматики применяют принципиально новые *безъякорные* реле напряжения, отличающиеся небольшой массой и малой инерционностью. Время срабатывания таких реле, исчисляется долями миллисекунды (в якорных реле – десятками миллисекунд). *Нейтральным* электромагнитным реле называют такое, у которого при отсутствии тока в обмотке управления магнитный поток в магнитной системе также отсутствует, то есть не имеет предварительного намагничивания.

Поляризованное электромагнитное реле отличается от нейтрального наличием постоянного магнита. В нем два магнитных потока: рабочий, создаваемый обмотками, по которым протекает ток, и поляризующий, создаваемый постоянным магнитом.

Надежность работы реле определяется надежностью работы контактной системы. Контакты делят на замыкающие или нормально разомкнутые (разомкнуты при отсутствии тока и замыкаются при срабатывании реле); размыкающие или нормально замкнутые (замкнуты при отсутствии тока и размыкаются при срабатывании реле), переключающие (управляю-

щие двумя электрическими цепями: одна электрическая цепь замыкается при срабатывании реле, вторая – при его отпуске).

В последние годы получают внедрение миниатюрные электромагнитные реле, к ним относятся язычковые реле повышенной надежности и быстродействия.

Наиболее характерным примером может служить электромагнитное реле (рис. 4.5, а). Его основными конструктивными узлами являются электромагнитная катушка 1 с управляющей обмоткой, на которую подается сигнал x , якорь 2, механически соединенный с контактной группой 3, осуществляющей коммутацию вторичной цепи, в которой формируется выходной сигнал y . Принцип действия реле позволяет малыми сигналами в первичной цепи управлять мощными токами – по вторичной, чем пользуются, применяя реле в качестве усилителей. Выходной может быть и неэлектрическая величина, например температура, давление. Используются и пневматические, и гидравлические реле, имеющие характеристики ступенчатого вида.

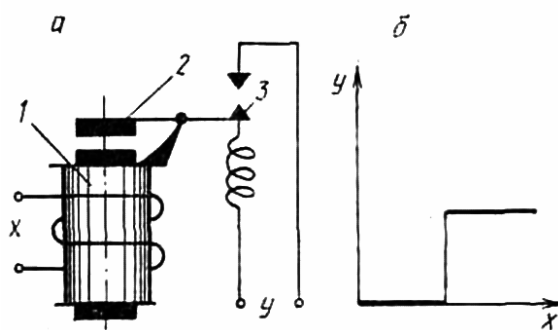


Рис. 4.5. Пример применения усилителя в схеме измерения влажности: а) электромагнитное реле; б) статическая характеристика электромагнитного реле; 1 – электромагнитная катушка; 2 – якорь; 3 – контактная группа

4.1.4. Электронные усилители

Использование датчиков с маломощными выходными сигналами порядка нескольких микроватт требует применения *электронных* (ламповых или полупроводниковых) усилителей постоянного и переменного тока.

Рассмотрим принцип действия простейшего *лампового усилителя*, собранного на пентоде (рис. 4.6, а), который помимо анода A , катода K и управляющей сетки C_T имеет дополнительно нить накала H , защитную $З$ и экранирующую $Э$ сетки для улучшения характеристик лампы. Входной сигнал от датчика подается на управляющую сетку через переменный резистор R , позволяющий регулировать усиление. Катод и защитная сетка соединены с землей через резистор R_1 , параллельно которому включен конденсатор C_1 . Они образуют цепь смещения. Работа усилителя обычно изображается графически в виде семейства статических анодно-сеточных характеристик $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$, изображенных на рис. 4.6, б.

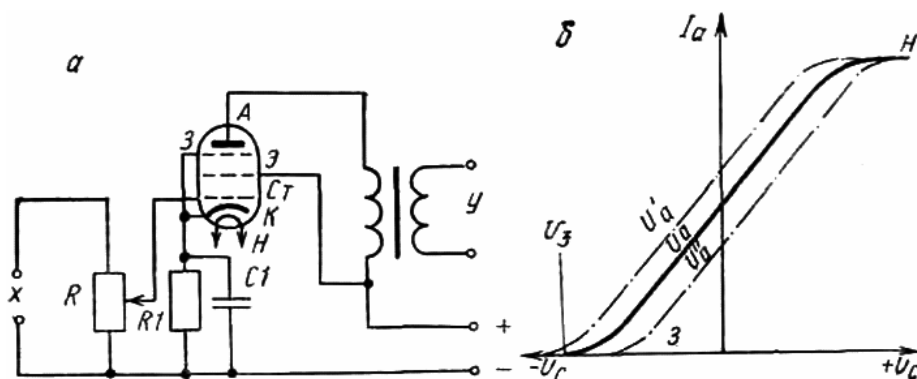


Рис. 4.6. а) принципиальная схема лампового усилителя, собранного на пентоде; б) статические характеристики

Характеристики имеют форму кривых с саморегулированием и зоной насыщения H , когда анодный ток достигает максимума или зоной за-
пираания 3 , когда анодный ток прекращается при некотором отрицательном
потенциале U_3 . Коэффициент усиления тем больше, чем больше крутизна
характеристики.

Ламповые усилители имеют выходную мощность до 500 Вт, поэтому
для получения больших выходных мощностей применяют тиратронные
(трехэлектродные лампы, заполненные аргоном, неоном или ртутными па-
рами) усилители. Ламповые усилители находят разнообразное применение
ввиду практической безынерционности, большого входного сопротивле-
ния, широкого диапазона рабочих частот, стабильности характеристик по
отношению к параметрам внешней среды, небольших массы и габаритов.
К основным их недостаткам следует отнести малые надежность, выходную
мощность и срок службы.

Новый этап в технике, в том числе и автоматике, наступил после
изобретения полупроводникового триода – транзистора. Соперник элек-
тронной лампы оказался чрезвычайно простым по конструкции, неболь-
ших размеров, долговечным, что позволило создать надежные, компактные
автоматические устройства, потребляющие по сравнению с ламповыми в
тысячи раз меньше энергии.

Несмотря на это существенный недостаток транзисторов – разброс
значений параметров.

В качестве полупроводниковых управляющих элементов использу-
ются кремниевые управляемые вентили или тиристоры, предназначенные
для токов до 100 А и напряжений до 800 В. По принципу действия тирис-
тор аналогичен тиратрону и обладает малой мощностью сигнала управле-

ния, безынерционностью, большим сроком службы. Полупроводниковые приборы весьма чувствительны к перегрузкам по напряжению и току. В табл. 3 приведены сравнительные данные усилителей некоторых типов.

Таблица 3

Технические характеристики усилителей

Тип усилителя	Коэффициент усиления K_N	Динамическая постоянная T_z , с	Выходная мощность N_2 , Вт
Гидравлический	$10^3 \dots 10^4$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	10^4
Магнитный	$10^2 \dots 10^6$	$10^{-2} \dots 1$	10^6
Ламповый	$10^5 \dots 10^{14}$	$10^{-8} \dots 10^{-2}$	10^2
Полупроводниковый	$10^2 \dots 10^6$	$10^{-5} \dots 10^{-2}$	10^2
Реле	$10^2 \dots 10^6$	$10^{-3} \dots 1$	10^6
Механический	до 10^3	$10^{-3} \dots 1$	10^5

Операционные усилители

Операционными усилителями (ОУ) называют многокаскадные усилители постоянного тока с дифференциальным входным каскадом, большим усилением и несимметричным выходом.

Первые ОУ строились на электронных лампах, работали с высокими напряжениями, имели большие размеры и стоимость. В начале 60-х годов ОУ стали серийно выпускаться в виде интегральных микросхем. Они имеют малые размеры, низкую стоимость, высокую надежность. Операционные усилители применяются в системах телекоммуникации, вычислительной технике, управлении процессами производства.

По принципу действия ОУ сходен с обычным усилителем. Он предназначен для усиления напряжения или мощности входного сигнала. Коэффициент усиления K равен отношению выходного напряжения к вызвавшему это приращение дифференциальному входному сигналу при отсутствии обратной связи (составляет $10^3 \dots 10^7$) и определяется при холостом ходе на выходе:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх.д}}.$$

На практике в большинстве случаев операционный усилитель используется с обратной связью. Применение отрицательной обратной связи позволяет увеличить входное сопротивление $R_{вх}$, уменьшить $R_{вых}$ и искажения и увеличить стабильность и точность, с которой задается коэффициент усиления.

В качестве примера рассмотрим ОУ общего применения К544УД1, выполненный по двухкаскадной схеме, принципиальная схема которого представлена на рис. 4.7.

Дифференциальный каскад построен на полевых транзисторах VT_1 и VT_2 с каналом n -типа. Активной нагрузкой этих транзисторов служат коллекторные цепи транзисторов VT_3 и VT_4 . Данная нагрузка задает одинаковые токи стоков, что приводит к уменьшению синфазной составляющей и температурного дрейфа каскада. Для стабилизации тока в истоковой цепи дифференциального каскада и уменьшения разброса параметров, характерного для полевых транзисторов, включен источник стабильного тока на биполярных транзисторах VT_6 , VT_7 , который обеспечивает автоматическую регулировку тока стока транзисторов VT_1 и VT_2 .

Транзистор VT_5 задает уровень смещения на транзисторы VT_3 и VT_4 , а также служит повторителем коллекторного напряжения транзистора VT_3 на базе транзистора VT_4 . Каскад на транзисторе VT_4 инвертирует этот сигнал, и на коллекторе его получается сумма сигналов, существующих между коллекторными цепями транзисторов VT_3 и VT_4 , в связи с чем дифференциальный выход преобразуется в несимметричный. Каскад на транзисторах VT_3 и VT_4 является источником тока, а совместно с повторителем на транзисторе VT_5 его называют токовым инвертором.

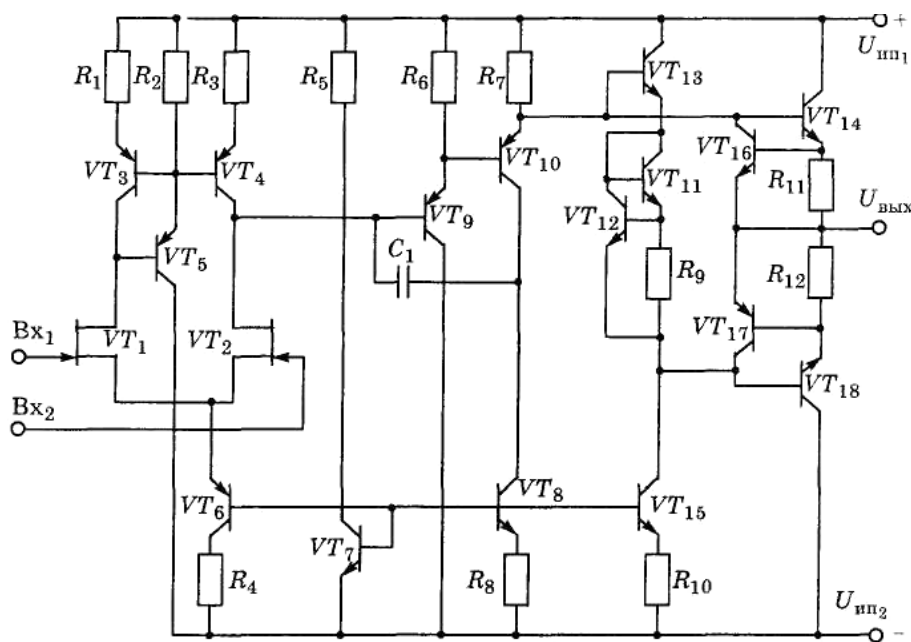


Рис. 4.7. Принципиальная электрическая схема операционного усилителя общего применения серии К544УД1

Сигнал с несимметричного выхода дифференциального каскада поступает на вход каскада промежуточного усиления, собранного на транзисторе VT_{10} по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой данного каскада является большое динамическое сопротивление источника стабильного тока, собранного на транзисторе VT_8 , за счет чего достигается большой коэффициент усиления. Выходной каскад собран на комплементарных транзисторах VT_{14} и VT_{18} , работающих в режиме класса AB . Смещение на базах выходных транзисторов осуществляется источником опорного напряжения на транзисторах VT_{11} и VT_{12} .

Защита выходного каскада от перегрузки и короткого замыкания осуществляется транзисторами VT_{16} и VT_{17} .

4.1.5. Многокаскадное усиление

Алгоритм функционирования усилителя ограничивается предельными значениями важнейших параметров (коэффициента усиления, выходной мощности, входных характеристик), поэтому одним усилителем не всегда удастся усилить сигнал. Кроме того, сигнал часто требуется преобразовать в иную форму для удобства использования в каналах управления.

Под каскадом понимают этап усиления. Чаще всего многокаскадное усиление используется в электронных схемах. Например, для получения большой выходной мощности на выходе усилителя должна стоять мощная лампа или несколько ламп, на сетку которых необходимо подать значительное напряжение. Датчик не обеспечивает усилитель такой схемы необходимым сигналом, поэтому его приходится усиливать в каскадах предварительного усиления. При комбинированном многокаскадном усилении последовательно соединяются усилители рассмотренных ранее типов: в гидравлических – золотникового II и струйного I типов (рис. 4.8, *а*), в электрогидравлических – магнитного I, реле II и струйного III (рис. 4.8, *б*) и других типов в зависимости от конкретных требований к построению схемы автоматизации и свойств объектов.

Коэффициент усиления многокаскадных усилителей равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов (ступеней)

$$K_N = \prod_{i=1}^n K_{Ni}$$

и может достигать достаточно больших значений.

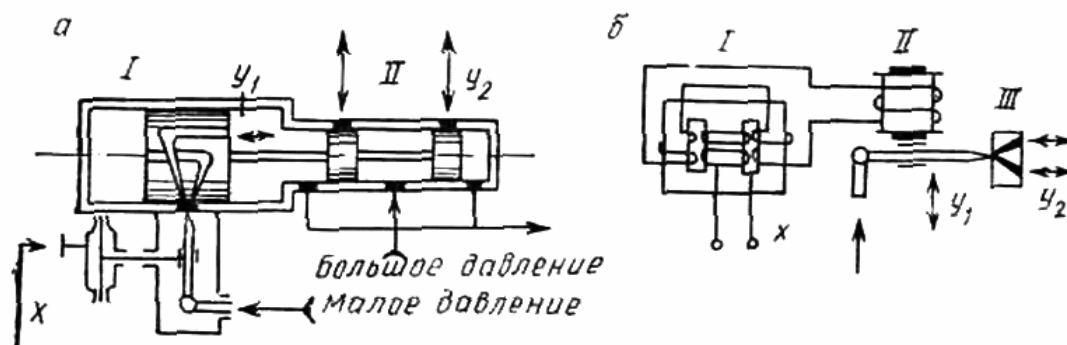


Рис. 4.8. Комбинированные усилители:
а) гидравлический; б) электрогидравлический

4.2. Регулирующие органы

Регулирующий орган (РО) – элемент в цепи воздействий, оказывающий непосредственное влияние на управляемый объект. Это воздействие может осуществляться изменением количества энергии (вещества), проходящего через объект, либо путем изменения характеристик (режима) объекта. В первом случае на объект влияют распределительные органы, во втором – регулирующие устройства. Функциональные и конструктивные признаки регулирующих органов зависят от вида рабочей среды (жидкость, газ, электроэнергия и т. п.) и назначения объекта.

4.2.1. Характеристики распределительных органов

В функцию распределительных органов входит изменение расхода различных рабочих сред. Их называют *дрессельно-регулирующей арматурой*. По назначению она подразделяется на запорную, дроссельно-регулирующую, предохранительную и специальную. Дроссельными называют регулирующие органы, для которых характерно уменьшение перепада давлений, то есть относительно большая потеря энергии среды. Распределительный орган перераспределяет потери давления в магистрали Δp_m и в самом органе $\Delta p_{p.o.}$, что показано на рис. 4.9 (p_n и p_k – начальное и конечное давление в объекте).

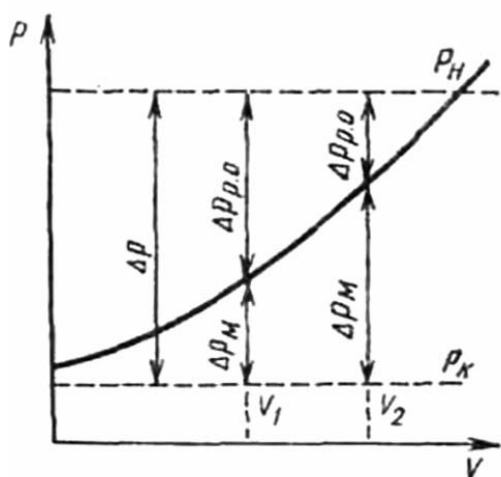


Рис. 4.9. Перераспределение потерь давления в магистрали и самом органе

Суммарные потери давления Δp , оставаясь постоянными, делятся на различные составляющие в зависимости от степени открытия дросселя (расхода V). Дроссельно-регулирующие органы представляют собой сложные местные сопротивления, в которых изменяется геометрия проходного сечения, параметры среды, режимы течения, появляется кавитация и другое.

Величина гидравлического сопротивления дроссельного регулирующего органа зависит от положения подвижной части (полотна шиберов или заслонки, плунжера клапана), то есть от степени его открытия n . При минимальном открытии он дает максимальное сопротивление и – наоборот. Минимальному открытию регулирующего органа соответствуют максимальные потери давления в самом регулирующем органе и минимальные потери давления в линии, подводящей рабочее вещество к регулирующему органу и отводящей это вещество от него. Границами этой линии или регулируемого участка служат те сечения трубопроводов или воздухопроводов, давления в которых практически не изменяются при любой степени открытия регулирующего органа.

Основные характеристики регулирующих органов:

- условный проход D_y – номинальный внутренний диаметр входного патрубка;
- условное давление p_y – наибольшее рабочее давление, допускаемое при заданных температуре рабочей среды и материале арматуры;
- условный ход S_y – ход затвора РО от полного открытия до полного закрытия (для поворотных РО – угол поворота α_y);
- коэффициент местного сопротивления при полном открытии ζ ;
- степень открытия m – отношение текущего значения хода s или угла поворота α к условному: $m = s / S_y = \alpha / \alpha_y$;
- пропускная способность K – массовый расход жидкости с плотностью $\rho = 1 \text{ т/м}^3$ при перепаде давления $\Delta p = 0,1 \text{ МПа}$;
- расходная характеристика $G = f(s)$ или $G = f(m)$ – зависимость расхода от положения затвора регулирующего органа. На рис. 4.10 показаны типичные формы расходных характеристик (P – равнопроцентная, Π – параболическая и L – линейная), из которых наилучшее качество регулирования обеспечивают линейная и равнопроцентная. В ряде случаев используется пропускная характеристика $K = f(m)$;
- конструктивная характеристика $F = f(m)$ – зависимость площади проходного сечения от степени открытия, которая определяет форму рас-

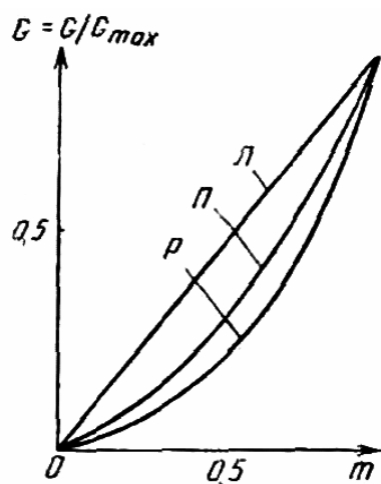


Рис. 4.10. Формы расходных характеристик

ходной характеристики. Выбор вида конструктивной характеристики называют *профилированием* регулирующего органа.

Конструктивная характеристика выражает только особенности конструкции данного регулирующего органа, не связывая их с особенностями потока, протекающего через него, а также с особенностями самого вещества и регулируемого объекта.

В САР работа регулирующего органа эквивалентна обычному усилительному звену, где входом является перемещение штока регулирующего органа, а выходом — изменение расхода через орган. Такая статическая

характеристика регулирующего органа называется расходной характеристикой дроссельных регулирующих органов. Расходная характеристика строится при следующих условиях:

- перепад давления в регулируемом участке является величиной постоянной;
- регулируемая среда несжимаема;
- регулируемая среда невязкая;
- условный коэффициент сопротивления линии и коэффициенты сопротивления регулирующего органа не зависят от расходов.

4.2.2. Основные типы распределительных органов

В зависимости от конструкции затвора РО принято классифицировать **по характеру перемещения подвижных элементов** затвора на *арматуру с перемещением затвора параллельно потоку* (клапаны и золотники), *перпендикулярно к потоку* (шиберные задвижки), *с вращением затвора* (поворотные заслонки, краны) и *со сжатием проходного канала* (шланговые и диафрагмовые клапаны). На рис. 4.11, а показана схема односедельного проходного клапана, рис. 4.11, б — двухседельного углового, рис. 4.11, в — поворотной заслонки, рис. 4.11, г — плунжерного клапана.

Двухседельные или двухпоточные конструкции обладают меньшим сопротивлением и почти разгружены от перепада давлений на затвор, чем уменьшается требуемое перестановочное усилие. Регулирующий орган может работать по схеме НО (нормально открытый) и НЗ (нормально закрытый), критерием служит отсутствие управляющего воздействия. Для

регулирования потоков воздуха и газов при статических давлениях до 10000 Па применяются шиберы, поворотные заслонки и многостворчатые жалюзийные клапаны.

Шиберы находят меньшее применение по сравнению с поворотными заслонками из-за значительных усилий, требуемых для их перемещения, а также из-за больших перемещений штока, необходимых для перестановки шиберов из одного крайнего положения в другое. Шибер, кроме того, как регулирующий орган менее надежен в работе вследствие трудностей, возникающих при уплотнениях сальника. Обычно с течением времени сальники теряют герметичность, что весьма нежелательно, особенно при транспортировании вредностей.

Поворотные заслонки в отличие от шиберов не имеют указанных недостатков: силы трения в осях при вращательном движении незначительны, легко осуществляется уплотнение осей, и перепад давлений, действующий на поворотные лопасти, в значительной степени уравнивается. Необходимое усилие для их перестановки существенно меньше, чем у шиберов. Однолопастные поворотные заслонки находят все большее применение, их начинают использовать уже при давлениях среды в несколько десятков атмосфер. Отмечаются еще и такие преимущества поворотных заслонок, как малое сопротивление при открытом положении, большая пропускная способность, чем у клапанов того же условного прохода, отсутствие вибрации и шума при работе, малая чувствительность к засорениям, небольшие масса и размеры заслонок по сравнению с клапанами. Существенным преимуществом поворотных заслонок оказывается и то, что расходная характеристика их при регулировании подачи горячей воды в теплообменные аппараты значительно лучше, чем у выпускных клапанов.

Многостворчатые жалюзийные клапаны, применяемые для регулирования расходов в вентиляции, по существу, представляют собой многолопастные поворотные заслонки. Они имеют практически те же преимущества, что и однолопастные поворотные заслонки. Однако при другом

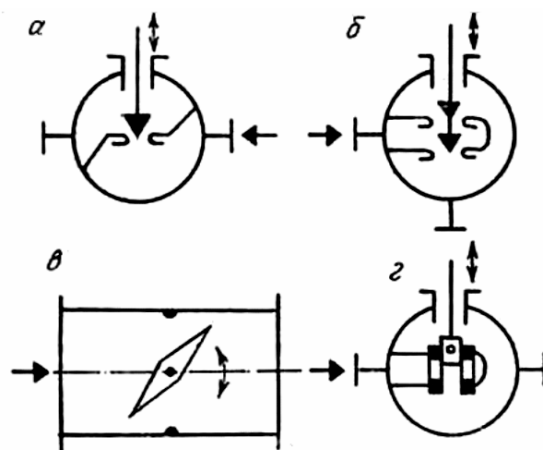


Рис. 4.11: а) схема односедельного проходного клапана; б) схема двухседельного углового клапана; в) схема поворотной заслонки; з) схема плунжерного клапана

количестве лопастей несколько меняются их расходные характеристики. Крутизна наклона кривых обычно увеличивается с ростом числа лопастей, увеличивается и пропуск воздуха при полном закрытии по такой же закономерности.

Для регулирования потоков пара, воды и воздуха при статических давлениях выше 10 000 Па применяются в основном клапаны и краны. Регулирующие краны не нашли широкого распространения, более часто применяются клапаны. Они бывают односедельными либо двухседельными. Недостатком односедельных клапанов является возникающее усилие от перепада давлений среды, обычно выталкивающее шток клапана при его закрытии. Это выталкивающее усилие при закрытом клапане определяется как произведение площади плунжера на разность давлений среды до и после клапана. Оно может достигать очень больших величин и требует дополнительных затрат энергии на работу исполнительного механизма. Обычно односедельные клапаны изготавливаются только размером до 50 мм.

Выпускаемые двухседельные клапаны более уравновешены, так как перепад давления среды воздействует в равной степени на верхнюю и нижнюю части плунжера.

Клапаны всех типов делятся на клапаны прямого и обратного действия. В клапанах прямого действия при движении плунжера вниз закрывается проходное отверстие, а в клапанах обратного действия – наоборот. Конструкция клапанов предусматривает возможность путем перевертывания плунжера при сборке, не меняя деталей, собрать клапан любого действия.

Необходимо отметить, что регулирующие органы должны устанавливаться на прямолинейных участках трубопровода с таким условием, чтобы местные сопротивления, искажающие поток, были расположены не ближе 10...15 диаметров. При меньшей длине прямолинейного участка рекомендуется перед дроссельными регулирующими органами ставить успокоители потока: сетки, трубчатые струевыпрямители и т. п. Особенно трудно, но необходимо предусматривать такие меры в установках кондиционирования воздуха, где потоки смешиваются, разделяются и количественно регулируются (регулирование расходов).

4.2.3. Регулирующие устройства

Как известно, изменение расхода в системе может быть достигнуто воздействием на сеть, включая распределительные регулирующие органы, и на управляемые гидравлические машины. Поле статических характеристик в координатах $p - V$ показано на рис. 4.12, из которого видно, что

режимная точка O , определяющая заданный расход, может изменять свое положение за счет изменения сопротивления системы R и характеристики нагнетателя H .

Управляющее воздействие может быть осуществлено за счет изменения поворота лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата, изменения частоты вращения колеса, отжатия нагнетательных клапанов, переключения цилиндров и других мероприятий.

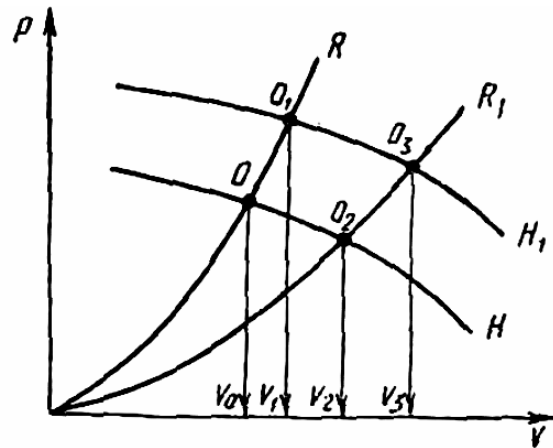


Рис. 4.12. Статические характеристики

Например, регулирование разрежения в топке котла осуществляется воздействием на направляющий аппарат дымососа или автоматическую гидромufту его привода. В турбинах регулирующим устройством (РУ) служит сопловой аппарат, неразрывно связанный с конструкцией турбины. В котельных установках при сжигании жидкого топлива, регулирующим устройством может быть турбофорсунка, твердого топлива — шурующая планка. В случае, когда регулируемой является электроэнергия, например при наличии электрокалориферов, роль РУ выполняют различные релейно-контакторные устройства, реостаты, трансформаторы. Распознавание РУ в сложной схеме полностью зависит от четкого представления о функционировании конкретного технологического процесса [18].

4.3. Расчет регулирующего органа для регулирования расхода воды

Цель: рассчитать регулирующий орган для регулирования расхода воды.

Данные для расчета: среда — вода; максимальный объемный расход — $Q_{\text{макс}} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$; перепад давлений при максимальном расходе — $\Delta P_{p.o} = 16 \text{ кгс/см}^2$; температура — $\theta = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; плотность — $\rho = 1 \text{ г/см}^3$; абсолютное давление до регулирующего органа — $P_1 = 18 \text{ кгс/см}^2$; абсолютное давление насыщенных паров — $P_n = 0,7 \text{ кгс/см}^2$ при $90 \text{ }^\circ\text{C}$; кинематическая вязкость — $\nu = 0,00328 \text{ см}^2/\text{с}$ при $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Методика расчета

1. По уравнению определяем максимальную пропускную способность $K_{v\max}$, в зависимости от $Q_{\max}$ и $\Delta P_{p.o}$:

$$K_{v\max} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{p.o}}} = 140 \sqrt{\frac{1}{16}} = 35 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $Q_{\max}$ – максимальный объемный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ρ – плотность жидкости, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\Delta P_{p.o}$ – перепад давления на регулирующем органе, $\text{кгс}/\text{см}^2$.

2. Предварительно по каталогу (табл. 4) выбираем двухседельный регулирующий орган, с условным проходом:

$$K_{vy} = 40 \approx 1,2 K_{v\max} = 42 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 4

Условные пропускные способности регулирующих органов

Диаметр условного прохода, D_y , мм	Значение K_{vy} , $\text{м}^3/\text{ч}$, регулирующего органа		
	клапанных		заслоночных
	односедельных	двухседельных	
6	0,25	—	—
10	1,5	—	—
15	0,16; 0,4; 1,0; 3,2	3,2; 4; 5; 6,3	—
20	1,6; 2,5; 4,0; 5,0	6,3; 8; 10	—
25	5; 6,3; 8; 10	6,3; 8; 10; 16	—
32	12	16; 25	—
40	20	25; 32; 40	—
50	32	25; 32; 40; 63	60
65	50	63; 100	100
80	80	63; 80; 100; 160	160
100	125	160; 250	250
125	200	250; 400	400
150	320	400; 630	600
200	500	630; 1000	1000
250	—	1000; 1600	1600

3. Выбранный регулирующий орган проверяют на влияние вязкости протекающей через него жидкости. Для этого рассчитывают критерий Рейнольдса (R_e) по формуле

$$R_e = 3530 \frac{Q_{\max}}{v D_y} = \frac{3530 \cdot 140}{0,00328 \cdot 50} = 3 \cdot 10^6,$$

где $Q_{\max}$ – максимальный объемный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 D_y – условный проход регулирующего органа, мм.

Так как полученное значение $Re > 2000$, то влияние вязкости на расход не учитывается и выбранный регулирующий орган проверяется на возможность возникновения кавитации.

4. Для проверки регулирующего органа на возможность возникновения кавитации определяем:

а) коэффициент сопротивления выбранного регулирующего органа:

$$\zeta_y = \frac{25,4 F_y^2}{K_{vy}^2} = \frac{25,4 \cdot 3,14^2 \cdot 5^4}{4^2 \cdot 40^2} = 6,12;$$

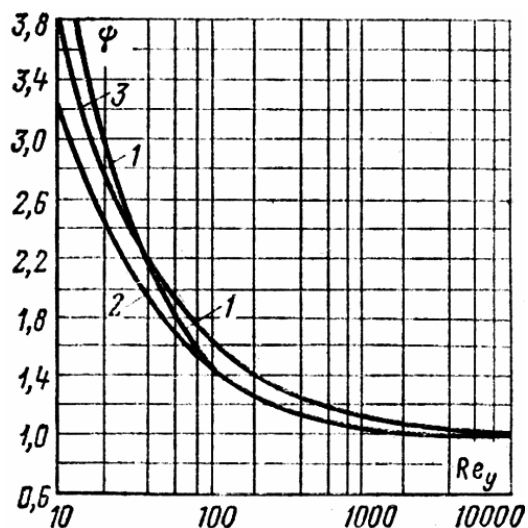
где $F_y = \pi D_y^2 / 4$ – площадь сечения входного патрубка регулирующего органа, см^2 ;

б) по кривой 1, изображенной на рис. 4.13, находим коэффициент кавитации $K_c = 0,51$;

в) определяем перепад давлений, при котором возникает кавитация:

$$\Delta P_{\text{кав}} = K_c (P_1 - P_n) = 0,51(18 - 0,7) = 8,8 \text{ кгс/см}^2.$$

Рис. 4.13. Зависимость коэффициента кавитации K_c и $K_{c\text{max}}$ от ζ_y : 1 – K_c для односедельных и двухседельных регулирующих органов при подаче жидкости на затвор; 2 – K_c и $K_{c\text{max}}$ для односедельных регулирующих органов при подаче жидкости под затвор; 3 – $K_{c\text{max}}$ для односедельных и двухседельных регулирующих органов при подаче жидкости на затвор



5. Заданный перепад давлений $\Delta P_{p.o.}$ больше $\Delta P_{\text{кав}}$, следовательно выбранный регулирующий орган будет работать в кавитационном режиме и не обеспечит заданный расход жидкости.

Если по условиям технологического процесса невозможно снизить $\Delta P_{p.o.}$ до $\Delta P_{\text{кав}}$ или увеличить $\Delta P_{\text{кав}}$ до $\Delta P_{p.o.}$, то необходимо выбрать ближайший больший регулирующий орган, для которого вновь определяется

ζ_y , K_c и $\Delta P_{\text{кав}}$. В данном случае выбираем двухседельный регулирующий орган с условным проходом $D_y = 80$ мм и $K_{vy} = 6,3$ м³/ч, для которого

$$\zeta_y = \frac{25,4 F_y^2}{K_{vy}^2} = \frac{25,4 \cdot 3,14^2 \cdot 8^4}{16^2 \cdot 63^2} = 16,2;$$

По кривой 3, изображенной на рис. 4.13, определяем коэффициент кавитации, соответствующий максимальному расходу – $K_{c \max} = 0,52$.

$$\Delta P_{\text{кав. max}} = K_{c \max} (P_1 - P_n) = 0,52(18 - 0,7) = 9 \text{ кгс/см}^2.$$

Определяем минимальную пропускную способность:

$$K_{v \max} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{\text{кав. max}}}} = 140 \sqrt{\frac{1}{9}} = 46,7.$$

Так как $1,2 \cdot K_{v \max} = 1,2 \cdot 46,7 = 56$ м³/ч меньше $K_{vy} = 63$ м³/ч, то вновь выбранный регулирующий орган обеспечит заданный максимальный расход в условиях кавитации, и выбор регулирующего органа по пропускной способности считается законченным.

4.4. Исполнительные механизмы

Исполнительные устройства (механизмы) или сервомоторы, получают сигнал от усилителя и формируют перестановочное усилие для привода в действие регулирующего органа. Базовый принцип классификации сервомотора – вид энергоносителя, в зависимости от которого они подразделяются на гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные.

По характеру перемещения рабочего органа бывают сервомоторы *непрерывного* и *дискретного* действия (открыто – закрыто), а также *поступательного* и *вращательного* движения. Основные характеристики сервомоторов – коэффициент усиления по мощности, скорость (постоянная или переменная) и усилие (перемещение) на выходе. Конструктивно сервомотор часто представляет единый узел вместе с усилителем, в особенности в гидравлических и пневматических устройствах.

Требования к исполнительным устройствам: линейное (угловое) перемещение согласуется с перемещением регулирующего органа; статическая характеристика должна быть по возможности линейной; сервомотор – реверсивный, с рабочими органами минимальной массы; мощность должна обеспечивать заданную скорость перемещения на любых режимах.

4.4.1. Гидравлические и пневматические исполнительные механизмы

Наибольшее распространение в технике получили поршневые, лопастные сервомоторы и гидромоторы, схемы которых приведены на рис. 4.14.

Поршневые (плунжерные) подразделяются на сервомоторы двустороннего (двуполостные) (рис. 4.14, *а*) и одностороннего (однopolостные) (рис. 4.14, *б*) действия. Обратное движение штока односторонних сервомоторов с переменной или постоянной скоростью осуществляется с помощью пружины 1 или противовеса 2.

Для преобразования поступательного движения поршня во вращательное в конструкцию сервомотора вводят кривошипно-шатунный механизм (рис. 4.14, *в*), что удобно для привода заслонок, кранов и т. д.

На рис. 4.14, *а* показан плунжерный исполнительный механизм, характеризующийся $D \ll S$.

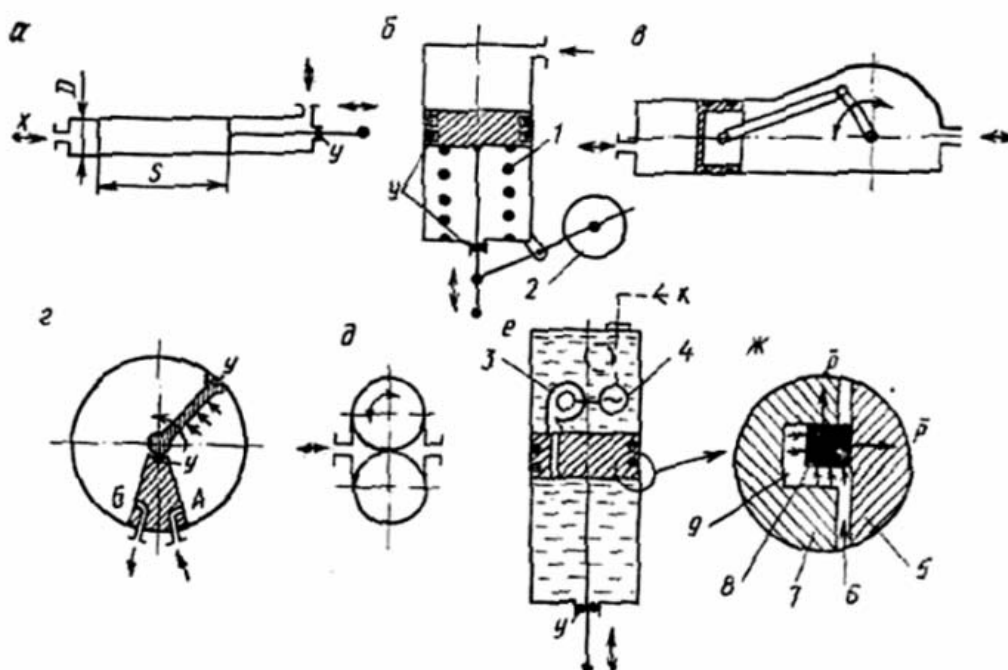


Рис. 4.14. Схемы поршневых, лопастных сервомоторов и гидромоторов: *а*) двуполостные; *б*) односторонние; *в*) кривошипно-шатунный механизм; *г*) вращательное движение выходного вала; *д*) зубчатый насос; *е*) принцип действия тростера; *ж*) принцип действия поршневого колеса; 1 – пружина; 2 – противовес; 3 – микронасос; 4 – микроэлектродвигатель; 5 – цилиндр; 6 – зазор; 7 – поршень; 8 – кольцо; 9 – выточка

Лопастные сервомоторы (рис. 4.14, *г*) позволяют получить непосредственно вращательное движение выходного вала, на котором закреплена лопасть, плотно пригнанная к соприкасающимся поверхностям корпуса.

Давление рабочей жидкости в полости, например A , на боковую поверхность, заставляет повернуться лопасть на угол до 5 рад. Гидромоторы конструктивно не отличаются от насосов роторно-поршневого, аксиального и лопастного типов, обладающих свойством обратимости. В таком режиме может работать и зубчатый насос с зацеплением соответствующего профиля (рис. 4.14, $д$). Разновидностью гидромотора является тростер, принцип действия которого виден из схемы на рис. 4.14, $е$). Микронасос 3, установленный внутри цилиндра, попеременно перекачивает жидкость в соответствующую полость под воздействием электрического сигнала x на микроэлектродвигатель 4.

Важную роль в конструкциях гидравлических исполнительных механизмов играют уплотнения, позволяющие свести до минимума утечки, отрицательно влияющие на функционирование систем автоматики. В качестве уплотнений $У$ используют эластичные манжеты, резиновые уплотнительные кольца, сальники и поршневые кольца. На рис. 4.14, $ж$ показан принцип действия поршневого кольца; по аналогии действует и кольцевое резиновое уплотнение. Эффект достигается за счет рабочего давления в самом цилиндре 5, которое в силу наличия зазора 6 действует на свободные поверхности кольца 8, и равнодействующие $\bar{p}$ прижимают кольцо к поверхностям цилиндра и выточке 9 в поршне 7.

подавляющее большинство пневматических сервомоторов – мембранного типа одно- и двуполостные с возвратом от пружин или противовеса. Встречается и сильфонный привод, но для малых перестановочных усилий. В последнее время стали применяться поршневые исполнительные механизмы, однако проблемой остаются трение и уплотнения в пневмоцилиндрах.

Устройство пневматического мембранного сервомотора показано на рис. 4.15. Сервомотор с мембраной 1, штоком 2, возвратной пружиной 3, уплотнением сальниковым или лабиринтовым 4 изготовлен в комплекте с регулирующим органом – клапаном 5, проходным (рис. 4.15, $а$ и $б$) и трехходовым (рис. 4.15, $в$).

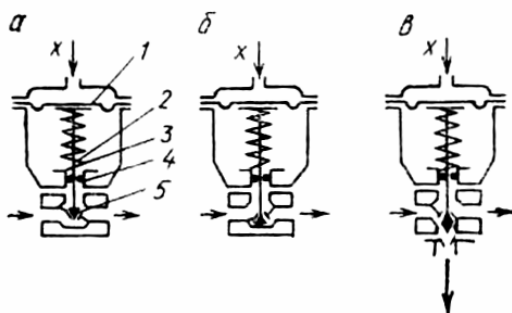


Рис. 4.15. Устройство пневматического мембранного сервомотора

4.4.2. Электрические исполнительные механизмы

Эти исполнительные механизмы должны обеспечивать перемещение регулирующего органа по командам, поступающим от электрического регулятора при автоматическом управлении.

Среди электрических сервомоторов, получивших наибольшее распространение в автоматике, следует назвать электродвигатели и электромагниты.

По устройству и принципу действия электрические двигатели классифицируют на *асинхронные*, *синхронные* и *коллекторные*. Асинхронные и синхронные – двигатели переменного тока; коллекторные – могут работать на переменном или постоянном; а универсальные – на переменном и постоянном токе. Асинхронные двигатели применяют для приводов с регулируемой и постоянной частотой вращения, синхронные – для приводов с постоянной частотой вращения. Двигатели постоянного тока широко используются для приводов с регулируемой частотой, коллекторные переменного тока – в системах, где требуется частота вращения, превышающая 3000 мин^{-1} , при промышленной частоте тока 50 Гц.

В качестве сервопривода применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (в виде беличьей клетки). Специфика использования электродвигателей в качестве сервомоторов определяет и характер предъявляемых к ним требований в отношении реверсивности, изменения частоты вращения и устойчивости в широком диапазоне, линейности статической характеристики, большого пускового момента при снятии сигнала управления, быстродействия, малых габаритов и массы.

В зависимости от сочетания электродвигателя и регулирующего органа различают две основные структурные схемы электрических сервомоторов (рис. 4.16).

Различие в них определяется степенью несоответствия быстроходности и вращательного движения сервомотора тихоходности и поступательному, реже вращательному движению затвора регулирующего органа. Поэтому в конструкциях появляются дополнительные узлы: передачи (редукторы, муфты) различных типов, конечные выключатели для останова сервомотора по достижении затвором крайних или заданных положений

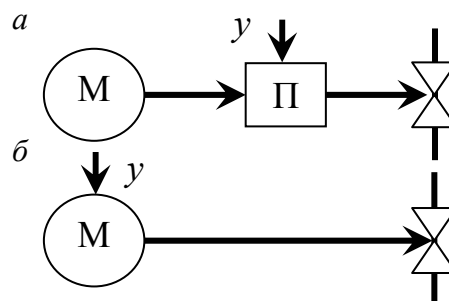


Рис. 4.16. Структурные схемы электрических сервомоторов:
а) неуправляемый двигатель;
б) управляемый двигатель

(элементы обратной связи). При неуправляемом или плохо управляемом двигателе управляющее воздействие u прикладывается к передаче, что показано на схеме, изображенной на рис. 4.16, *а*. Схема на рис. 4.16, *б* предполагает наличие управляемого двигателя.

Долгое время большинство электродвигателей выпускались быстроходными, что создавало определенные трудности при сочленении с регулирующими органами. Появление моторов с малой скоростью вращения, например серии МЭО, которые совершают один оборот за 40, 100, 250 и 630 с, позволило значительно усовершенствовать технику автоматизации. Разработана серия унифицированных исполнительных механизмов блочно-модульной конструкции.

Рассмотрим конструкцию электрических сервомоторов (рис. 4.17, *а*). В корпусе из легкого сплава, разделенном на три отделения Э, Р, К, размещаются соответственно электродвигатель, редуктор и блок SQ конечных (предельных) выключателей. Электрическая схема (рис. 17, *б*) представлена на примере сервомотора типа ДР-1М, широко применяемого при автоматизации сантехсистем. От нее практически не отличается компоновочная схема исполнительного механизма типа ПР, имеющего два электродвигателя. ДР предназначен для двухпозиционного регулирования, ПР – пропорционального.

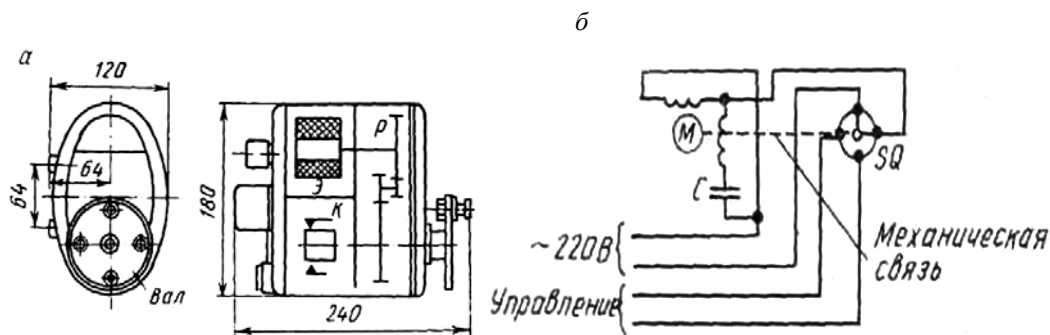


Рис. 4.17. Электрический сервомотор:
а) конструкция электрического сервомотора;
б) электрическая схема сервомотора типа ДР-1М

Электромагнитные приводы применяются для приведения в действие регулирующих органов с поступательным движением затвора – клапанов, задвижек, золотников. Чаще всего используется прямоходовый электромагнит с втягивающимся якорем или соленоид (рис. 4.18, *а*), хотя возможны и конструкции с притягивающимся (рис. 4.18, *б*) и поворотным (рис. 4.18, *в*) якорем. Электромагнитные сервомоторы работают в позици-

онном (релейном) режиме – открыто – закрыто, но существуют и многокомпозиционные исполнительные устройства.

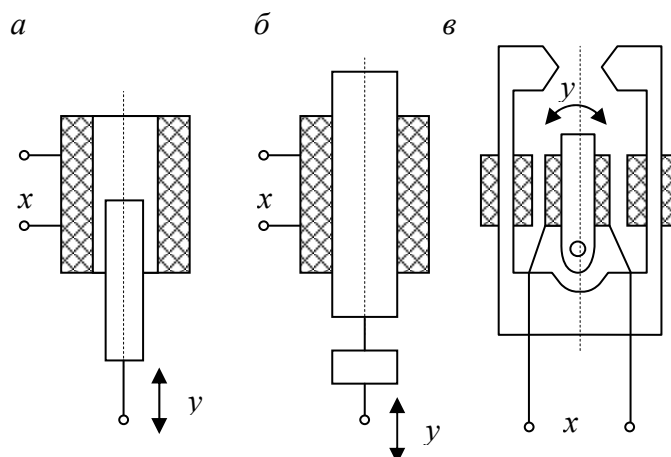


Рис. 4.18. Прямоходовой электромагнит: а) с втягивающимся якорем; б) с притягивающимся якорем; в) с поворотным якорем

4.5. Автоматические регуляторы

Для обеспечения нормального хода технологических процессов, поддержания или изменения по заданным законам таких величин, как температура, давление, расход, уровень и другие применяют автоматические регуляторы или системы автоматического регулирования (управления).

Автоматический регулятор – это прибор или совокупность приборов, которые сравнивают текущее значение регулируемой величины с заданным значением, воздействуют на технологический процесс для поддержания текущего значения регулируемой величины равным заданному.

Регулирование представляет собой процесс, в ходе которого воздействуя с помощью автоматического регулятора на текущее значение регулируемой величины, стремятся сделать его равным заданному, то есть свести ошибки к нулю.

Автоматический регулятор состоит из задающего устройства – *задатчика*, создающего так называемое управляющее воздействие; *измерительного устройства*, определяющего отклонения регулируемой величины от заданного значения и воздействующего на управляющее устройство регулятора; *управляющего устройства*, воспринимающего воздействие от измерительного устройства и управляющего подачей энергии к исполнительному механизму непосредственно или через усилитель.

4.5.1. Классификация автоматических регуляторов

Существующая классификация регуляторов сложна и разноречива. Это объясняется отождествлением понятий регулятор и система регулирования. Поэтому будем классифицировать отдельно автоматические регуляторы, как **функциональные устройства**.

Классификация автоматических регуляторов осуществляется по следующим признакам:

- назначения – в зависимости от поставленной цели управления и объекта управления. Существуют регуляторы управления кондиционерами, движением транспортных средств и т. д.;
- регулируемой величины. Различают регуляторы давления, температуры, расхода, уровня и другие;
- числа входных величин – одномерные, одноточечные (поплавковый регулятор уровня), многомерные, многоточечные (регулятор отпуска теплоты на отопление, измеряющий температуру наружного и внутреннего воздуха);
- способа действия – прямого и косвенного;
- рода вспомогательной энергии. Регуляторы подразделяются на пневматические, гидравлические, электрические (электронные), комбинированные;
- числа исполнительных устройств – простого регулирования (один сервомотор) и сложного (несколько сервомоторов);
- характера регулирующего воздействия – непрерывного и прерывного действия. У регуляторов прерывного действия непрерывному изменению входной величины соответствует прерывистое изменение регулирующего воздействия, хотя бы в одном из элементов регулятора, существенным образом влияющее на работу регулятора в целом. Эти регуляторы делятся на позиционные и импульсные.

Характеристика действия регулятора – это зависимость перемещения регулирующего органа от изменения регулируемой величины.

4.5.1.1. Регуляторы прерывного действия

Регулятор импульсного действия – регулятор, имеющий импульсное звено, которое преобразует изменение регулирующей величины в последовательность импульсов, амплитуда, длительность или частота которых зависит от установленного режима работы этого звена. В зависимости от характера изменения импульсов существуют регуляторы:

- с преобразованием изменения регулируемой величины в последовательность импульсов, амплитуда которых зависит от значения отклонения регулируемой величины;
- в которых длительность импульсов зависит от изменения регулируемой величины;
- с преобразованием изменения регулируемой величины в последовательность импульсов с неизменной амплитудой и длительностью, но с переменным знаком, зависящим от изменения знака величины.

Позиционный регулятор – регулятор, у которого воздействие на исполнительный механизм может иметь только определенное число значений, соответствующих числу позиций отклонения регулируемой величины от заданного значения, а его знак зависит от знака отклонения. Наибольшее применение получили двух- и трехпозиционные регуляторы.

Двухпозиционный регулятор – регулятор, который при переходе регулируемой величины через заданное значение переводит регулирующий орган из одного крайнего положения в другое, типа «открыто – закрыто» (рис. 4.19). Иногда двухпозиционный регулятор настраивают так, чтобы проходное отверстие регулирующего органа было частично открыто или закрыто в пределах фиксированных положений (в целях уменьшения возможного перерегулирования при двухпозиционном регулировании допускается частичное приоткрывание байпасного вентиля).

В *трехпозиционном регуляторе*, кроме крайних положений регулирующего органа (рис. 4.20), существует еще промежуточное положение (нейтральная зона). В многопозиционном регуляторе таких промежуточных положений регулирующего органа несколько.



Рис. 4.19. Графическое изображение действия двухпозиционного регулятора



Рис. 4.20. Графическое изображение действия трехпозиционного регулятора

4.5.1.2. Регуляторы непрерывного действия

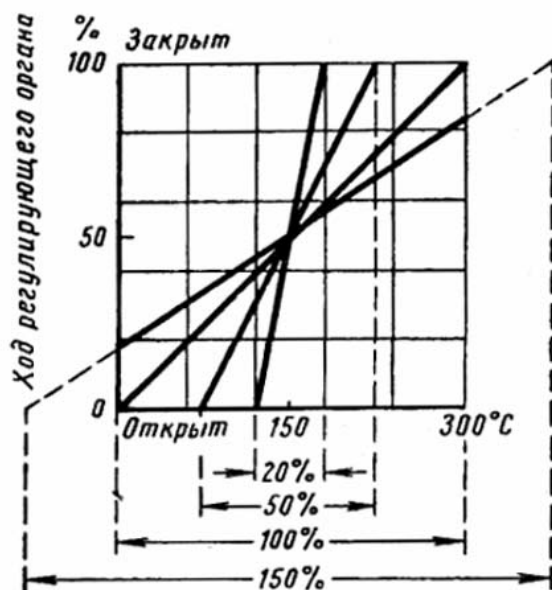


Рис. 4.21. Графическое изображение действия П-регулятора

Эти регуляторы классифицируются по закону регулирования, то есть по закону изменения выходного сигнала в зависимости от изменения регулируемой величины.

Пропорциональный (статический или регулятор с жесткой обратной связью) или сокращенно П-регулятор. Регулирующий орган изменяет свое положение по такой же закономерности, по какой изменяется регулируемая величина; скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна скорости изменения регулируемой величины.

Действие пропорционального регулятора заключается в том, чтобы

«догнать» отклонившуюся величину и остановить ее, то есть прекратить ее дальнейшее изменение.

Для пропорционального регулятора диапазон регулируемой величины, в пределах которого происходит перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое, является *пределом пропорциональности* (рис. 4.20 и табл. 5).

Пределом пропорциональности регулятора называется участок шкалы, выраженный в процентах длины всей шкалы, и в пределах которого изменения регулируемой величины вызывают перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое (предел пропорциональности также называют пределом дросселирования или степенью обратной связи).

Предел пропорциональности регулятора является величиной, обратной его чувствительности.

Чувствительность регулятора рассчитывается по формуле

$$S = \frac{100h_0}{DL},$$

где h_0 — полный ход регулирующего органа в мм;

D — предел пропорциональности в %;

L — длина шкалы регулятора в мм.

Регуляторы с пределом пропорциональности 10 % и менее становятся двухпозиционными.

Таблица 5

Зависимость между изменением регулируемой величины и перемещением регулирующего органа при разных пределах пропорциональности

Предел пропорциональности (%)	Перемещение пера по диаграмме диапазона (%)	Перемещение регулирующего органа от полного хода (%)
10	1	10
10	5	50
100	1	1
100	50	50
150	1	0,66

Предел пропорциональности обеспечивается лишь при наличии в регуляторах так называемой жесткой обратной связи, которая характеризуется тем, что передаваемое ею воздействие зависит только от выходной величины и не зависит от времени.

Интегральный регулятор (астатический или регулятор без обратной связи) или сокращенно И-регулятор. Регулирующий орган при отклонении регулируемой величины от заданного значения перемещается более или менее медленно и все время в одном направлении до тех пор, пока регулируемая величина не придет к заданному значению. Схематично принцип действия интегрального регулятора показан на рис. 4.22. Такие регуляторы бывают с постоянной или переменной скоростью перемещения регулирующего органа.

Положительной особенностью интегрального регулятора является то, что при поддержании величины на заданном значении регулирующий орган может занимать любое положение в пределах своего хода.

Недостатком регулятора является его замедленное действие.

Пропорционально-интегральный регулятор или сокращенно ПИ-регулятор (их также называют изодромными регуляторами или регуляторами с упругой обратной связью) Совмещают свойства пропорционального (статического) и интегрального (астатического) регуляторов и

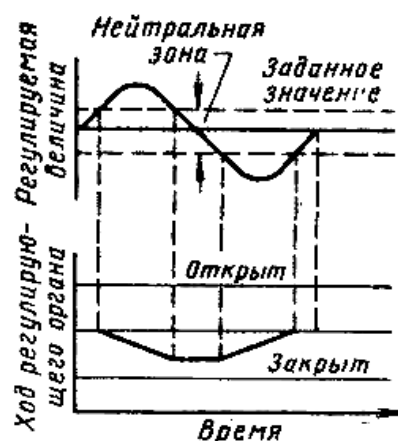


Рис. 4.22. Графическое изображение действия И-регулятора с постоянной скоростью

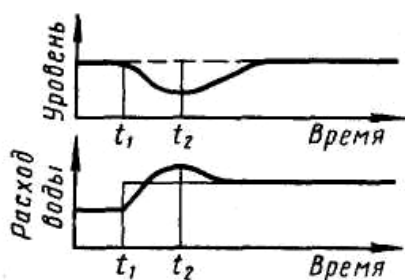


Рис. 4.23. Графическое изображение действия ПИ – регулятора

обеспечивают поддержание заданного значения регулируемой величины без остаточного отклонения. Регулирующий орган может занимать любое положение в пределах своего рабочего хода.

Действие регулятора показано на рис. 4.23, из которого видно, что регулятор при поддержании величин на заданном значении может устанавливать регулируемый орган в любом положении в пределах его хода.

В регуляторах пропорциональное действие осуществляется жесткой обратной связью, а изодромное действие – упругой обратной связью. *Упругая обратная связь* (изодром) – обратная связь, которая характеризуется тем, что передаваемое ею воздействие существует только в переходном процессе и по его окончании исчезает.

Действие изодрома характеризуется скоростью и временем изодрома.

Скорость изодрома – это скорость, с которой регулируемый орган перемещается под действием астатической составляющей регулятора и которая определяется перемещением регулирующего органа и выражается в процентах его хода в минуту после предварительного начального мгновенного перемещения регулирующего органа, вызванного действием изменения величины (пропорциональной составляющей):

$$r_a = \frac{\Delta h_{из}}{t_{из}},$$

где $\Delta h_{из}$ – изодромное перемещение регулирующего органа в процентах полного хода;

$t_{из}$ – время, в течение которого произошло это перемещение, в мин.

Изодромное действие может быть показано в виде кривых (рис. 4.24). В момент O происходит резкое изменение величины, вследствие чего мгновенно переместится регулируемый орган при воздействии пропорциональной составляющей (точка z), после чего начнется изодромное перемещение регулирующего органа.

Параметром, характеризующим изодромное действие, является *время изодрома* – время, в течение которого происходит изодромное перемещение регулирующего органа на 1 % его хода при предварительном мгновенном перемещении его на 1 % за счет изменения величины:

$$t_i = \frac{\Delta h_{np}}{r_a}.$$

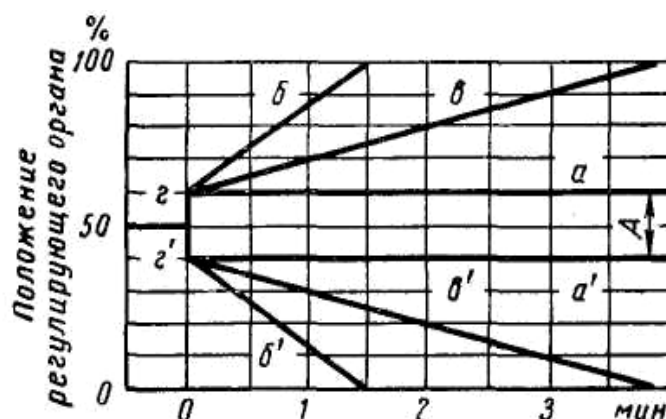


Рис. 4.24. Изодромные характеристики регулятора: *a* – при нулевой скорости изодрома; *б* – при максимальной скорости; *в* – при средней скорости; Δz – мгновенное перемещение регулирующего органа от пропорциональной составляющей

Таким образом, относительная скорость изодрома есть величина, обратная времени изодрома:

$$r_i = \frac{1}{t_i}.$$

Время изодрома может изменяться от 0,1...0,5 мин до бесконечности.

Малому времени изодрома соответствует большая скорость регулирования, а большому времени изодрома – малая.

Пропорционально-дифференциальный и пропорционально-интегрально-дифференциальный регуляторы или сокращенно соответственно ПД- и ПИД-регуляторы (или регуляторы с предварением). Эти регуляторы имеют дополнительное устройство, благодаря которому процесс регулирования протекает с учетом скорости изменения регулируемой величины. В этих регуляторах к пропорциональному действию добавляется дополнительное воздействие от скорости изменения регулируемой величины, которое заставляет перемещаться регулирующий орган с некоторым опережением, возрастающим с увеличением скорости изменения регулируемой величины. С уменьшением скорости изменения регулируемой величины это опережающее перемещение также уменьшается и полностью прекращается, когда регулируемая величина перестает изменяться.

Поскольку скорость изменения величины есть первая производная ее по времени, то такие регуляторы еще называют регуляторами по первой производной.

Приставка предварения дает воздействие на регулирующее устройство, которое заставляет регулирующий орган перемещаться с некоторым временным опережением, возрастающим с увеличением скорости измене-

ния величины. С уменьшением скорости изменения величины уменьшается воздействие предварения и прекращается с прекращением изменения величины.

Время предварения равно:

$$t_{np} = t_2 - t_1.$$

Обычно время предварения равно 0,1...10 мин.

В регуляторах *прямого действия* чувствительный элемент непосредственно воздействует на регулирующий орган, используя при этом энергию, получаемую от регулируемой среды. У них измерительное устройство и исполнительный механизм составляют единое целое с регулирующим органом и воздействуют на него посредством механических связей.

В регуляторах *непрямого действия*, расположенных на значительном удалении от регулирующих органов, управление регулирующим органом производится с помощью энергии, получаемой от постороннего источника.

К преимуществам регуляторов прямого действия относится простота их конструкции и надежность работы, к недостаткам – относительно большая погрешность регулирования и непригодность к дистанционному управлению.

В *пневматических регуляторах* используется энергия сжатого воздуха. Эти регуляторы надежны в работе и безопасны в пожарном отношении.

В *гидравлических регуляторах* используется энергия жидкости. Они надежны в работе и могут развивать большие перестановочные усилия на исполнительном механизме. Однако имеют ряд недостатков: ограниченный радиус действия, определяемый длиной импульсного трубопровода, зависимость рабочих характеристик от температуры рабочей жидкости и огнеопасность (в случае использования масла).

Наибольшее распространение получили *электрические регуляторы*, которые подразделяют на электромеханические и электронные. Основное преимущество электрических регуляторов по сравнению с пневматическими и гидравлическими – возможность передачи командных импульсов к промежуточным устройствам и исполнительному механизму на практически неограниченные расстояния с минимальным запаздыванием.

4.5.2. Основные свойства регуляторов

Независимо от особенностей классификации автоматическим регуляторам присущи определенные общие свойства. Качество того или иного регулятора может быть оценено следующими характеристиками регуляторов.

Нечувствительностью регулятора называется диапазон изменения регулируемой величины, в котором регулятор не формирует выходного сигнала. Нечувствительность зависит от конструктивных особенностей элементов регулятора, сил трения и зазоров в соединениях устройств, изменения физических характеристик материалов под влиянием внешних условий и во времени (старение) и причин эксплуатационного характера.

Неравномерностью регулирования называется изменение регулируемой величины при изменении нагрузки от минимальной до максимальной, которое необходимо для перемещения регулирующего органа из одного крайнего положения в другое. Иногда неравномерность называют дифференциалом или зоной пропорциональности. Для изменения неравномерности в регуляторах предусматриваются специальные настроечные устройства.

Регулировочная характеристика – часть общей режимной характеристики системы.

Автоматическому регулятору, как и объекту, свойственны запаздывание и инерционность, влияющие на погрешность регулятора.

4.5.3. Выбор регуляторов на основании ориентировочных сведений об объекте

Выбор типа регулятора необходимо всегда решать только для конкретного регулируемого объекта и совместно с учетом характеристик объекта.

Тот или иной регулятор выбирается по принципу от наиболее простого к более сложному. При этом следует всегда иметь ввиду, что сложные автоматические регуляторы имеют более высокую стоимость и менее надежны в работе, чем простые.

Простоту и надежность регуляторов во многом определяют их динамические характеристики и вид потребляемой энергии на привод регулирующего органа. При выборе типа регулятора можно рекомендовать сначала подобрать необходимую и допустимую динамическую характеристику регулятора, а затем уже источник посторонней энергии, если он действительно нужен.

При отсутствии сведений о динамических свойствах проектируемого объекта выбор регуляторов следует производить по аналогии с действующими объектами или же на основании предположительных соображений о свойствах данного объекта, учитывая при этом критерии по выбору регуляторов (табл. 6).

Критерии выбора регуляторов по роду действия

Наименование регулятора по роду действия	Критерий
Импульсный	$\frac{\tau}{T_0} > 0,5 - 1,0$
Релейный	$0 < \frac{\tau}{T_0} < 0,2$
Непрерывный	$\frac{\tau}{T_0} > 0$

Помимо указанных критериев необходимо также учитывать свойства объектов, для которых приемлемы следующие регуляторы.

1. Импульсные регуляторы могут применяться в объектах без большого запаздывания, обладающих средней емкостью при постоянной или плавно и мало меняющейся нагрузке, и при соблюдении условий, когда

$$\frac{\tau}{T_0} > 0,5 \dots 1,0.$$

2. Двухпозиционные регуляторы могут применяться в объектах без большого запаздывания, обладающих большой емкостью при постоянной или очень мало меняющейся нагрузке, и при соблюдении условий, когда

$$0 < \frac{\tau}{T_0} < 0,2.$$

Эти регуляторы могут быть применимы для объектов с одной емкостью без свойств самовыравнивания. Для двух- и более емкостных объектов двухпозиционное регулирование применяется редко только в тех случаях, когда не требуется большая точность поддержания регулируемой величины.

3. И-регуляторы применяются в объектах с самовыравниванием, обладающих как малой, так и большой емкостью, с небольшим запаздыванием и при медленных изменениях нагрузки.

4. П-регуляторы применяются в объектах со средней емкостью, с небольшим запаздыванием и при небольших изменениях нагрузки. Пропорциональные регуляторы большей частью находят применение для одно- и реже двухемкостных объектов. Для многоемкостных объектов пропорциональные регуляторы применяются ограниченно.

5. ПИ-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с большим запаздыванием и большими, но медленными изменениями нагрузки. Эти регуляторы могут применяться для объектов со значительным запаздыванием (при $\tau > 0,1T_0$) и для объектов многоемкостных.

6. ПД-регуляторы применяются в объектах со средней емкостью, при большом времени запаздывания и при малых изменениях нагрузки.

7. ПИД-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с очень большим запаздыванием и при больших и резких изменениях нагрузки.

4.5.4. Выбор оптимальных значений параметров регулятора

Выше излагалось, что для каждого объекта с его характерными динамическими свойствами необходимо соответственно настроить регулятор. Оптимальные значения параметров настройки регуляторов можно определить по специальным кривым, а также путем расчета. Однако при практической работе найденные значения параметров настроек корректируются при наладке регулятора по кривым регистрации регулируемой величины. Ниже приводятся практические сведения для приближенного определения значений этих параметров.

П-регулятор

Чем больше предел пропорциональности, тем больше остаточное отклонение величины. Чем меньше предел пропорциональности, тем больше амплитуда затухающих колебаний и больше время переходного процесса, но остаточное отклонение величины становится меньше.

Для пропорциональных регуляторов увеличение емкости объекта благоприятно влияет на качество регулирования, при этом следует уменьшить пределы пропорциональности. При наличии запаздывания надо увеличить пределы пропорциональности. Чем больше скорость перемещения регулирующего органа, тем выше устойчивость и более высокое качество регулирования.

Необходимая величина пределов пропорциональности:

$$D = \frac{100 \cdot V \tau}{\Delta P},$$

где V – скорость изменения величины, выраженная в процентах приращения в единицу времени;

τ – время запаздывания;

ΔP – перемещение регулирующего органа в процентах полного хода, вызвавшего возмущение.

Для объектов без самовыравнивания предел пропорциональности может быть определен по формуле

$$D = i \cdot V\tau,$$

где i – коэффициент чувствительности измерительной части регулятора.

Для объектов с самовыравниванием предел пропорциональности определяется по формуле

$$D = \frac{2,6i}{\zeta} \left[\frac{V\zeta\tau - 0,08}{V\zeta\tau + 0,6} \right],$$

где ζ – коэффициент самовыравнивания.

И-регулятор

С уменьшением времени изодрома увеличиваются переходный период и колебания величины. С увеличением пределов пропорциональности уменьшается переходный период.

Необходимая величина предела пропорциональности определяется по формуле

$$D = \frac{110V\tau}{\Delta P},$$

где время изодрома – $t = 3,3\tau$.

ПИД-регулятор

Необходимую величину предела пропорциональности для этих регуляторов приближенно вычисляют по формуле

$$D = \frac{83V\tau}{\Delta P},$$

где время изодрома $t = 2\tau$; время предварения $t_{np} = 0,5\tau$.

Не менее важным фактором для хорошей работы регулятора является рациональный выбор пределов зоны нечувствительности и скорости регулирования.

Регулятор не реагирует на отклонение регулируемой величины, если оно меньше $\frac{\Delta}{2}$.

Большая зона нечувствительности, равная $\frac{\Delta}{2} \cdot 2 = \Delta$, ухудшает качество регулирования, так как регулятор в этих пределах не может обнаружить возмущение. Регулятор начнет реагировать лишь тогда, когда вели-

чина выйдет за пределы этой зоны. Наличие большой зоны нечувствительности вызывает увеличение запаздывания регулятора. Однако при регуляторе с электроприводом зона нечувствительности не должна быть чрезмерно малой, так как при этом будут излишне частые включения, что, в свою очередь, приведет к быстрому износу привода.

При наличии запаздывания регулятора или выбега исполнительного механизма колебания величины значительно превысят ширину зоны нечувствительности; в этих случаях полезно иметь несколько большую зону нечувствительности, увеличивая при этом запаздывание регулятора.

Для емкостных объектов со значительным переходным запаздыванием зону нечувствительности следует сокращать. Это увеличит качество регулирования и не приведет к излишне частым включениям исполнительного механизма, так как кривая сравнительно большое время не будет выходить из зоны Δ . При этом следует учитывать длительно допустимые отклонения $\sigma_{\text{длит}}$ регулируемой величины. Следует выбирать зону нечувствительности в пределах $0,3 \dots 0,5 \sigma_{\text{длит}}$.

При работе объекта на малых нагрузках скорость регулирования выбирается сравнительно небольшой. Скорость регулирования увеличивается при переходе на большую нагрузку. Снижение скорости регулирования может повысить устойчивость регулирования лишь в очень редких случаях, например при астатическом регуляторе на объекте большой емкости.

4.6. Выбор регуляторов на основании расчетов

Цель: освоить методику расчета и выбора автоматического регулятора.

Для действующего объекта при наличии кривых разгона либо частотных характеристик или для вновь проектируемого объекта, выбор регуляторов следует производить на основании расчетов.

Характер переходного процесса, то есть показатель качества регулирования, определяется динамическими свойствами объекта, выбранным законом регулирования и коэффициентами управления этого закона (параметрами).

Коэффициенты управления закона регулирования присущи определенному типу регуляторов, математические характеристики которых приведены в [8, табл. 41]. На основании уравнений объектов и характеристик регуляторов выбирают соответствующий регулятор. Большинству технологических требований удовлетворяют три характерных переходных процесса, которые приведены в [8, табл. 42].

Расчетные формулы динамических свойств простых, часто встречающихся одноемкостных объектов приведены в [8, табл. 43], на основании которых производят выбор регулятора.

По приведенной схеме регулирования температуры воды путем смешения пара (рис. 4.24) произведем расчет и выбор регулятора.

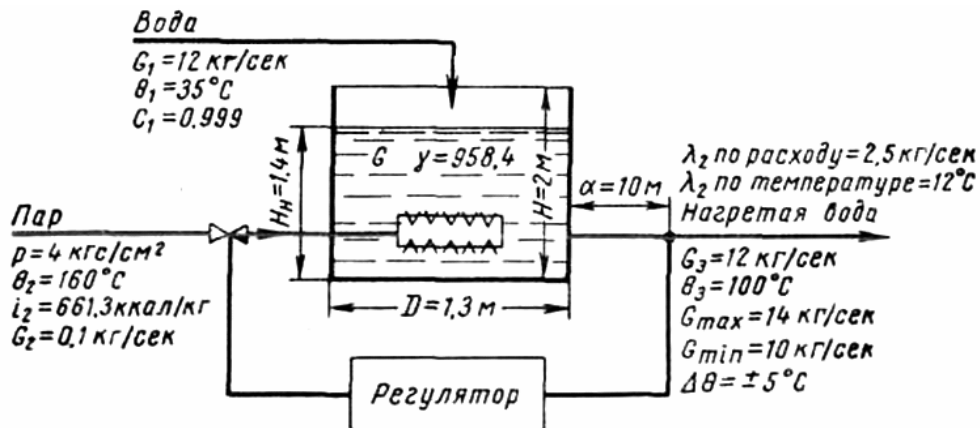


Рис. 4.24. Схема регулирования температуры воды путем смешения пара

Методика расчета и выбора автоматического регулятора:

1. Определяем вес жидкости (кг) в резервуаре:

$$G = H_n \frac{\pi D^2}{4} \gamma = 1,4 \frac{3,14 \cdot 1,3^2}{4} \cdot 958,4 = 1780.$$

2. Определяем постоянную времени объекта (с):

$$T_0 = \frac{G(i_2 - \theta_3 C_3)}{G_{\min} i_2} = \frac{1780 \cdot (663,1 - 100 \cdot 1)}{10 \cdot 661,3} = 151.$$

3. Определяем время запаздывания объекта (с):

$$\tau_0 = \frac{L}{v} = \frac{10}{1,5} = 6,7.$$

4. Постоянная регулятора $T_p = 14,8$.

5. Время запаздывания регулятора $\tau_p = 9,5$.

6. Значение a (ккал/с) при возмущении по расходу вычисляется по формуле

$$a = (\theta_3 C_3 - \theta_1 C_1) \lambda_1 = (100 \cdot 1 - 35 \cdot 0,999) \cdot 2,5 = 162,6.$$

7. Значение a (ккал/с) при возмущении по температуре вычисляется по формуле

$$a = G_1 C_1 \lambda_2 = 12 \cdot 0,999 \cdot 12 \approx 144.$$

Принимаем значение a по расходу как большее из таблиц.

8. Определяем динамический коэффициент:

$$R_o = \frac{\Delta \sigma (G_{\min} - G_2) C_3}{a} = \frac{5(10 - 0,1)}{162,6} = 0,31.$$

9. Определяем общее время запаздывания (с):

$$\tau_{об} = \tau_0 + \tau_p = 6,7 + 9,5 = 16,2.$$

10. Вычислим отношение $\frac{\tau_{об}}{T_{об}}$:

$$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = \frac{16,2}{151} = 0,107.$$

11. На основании данных [8, табл. 42] выбираем вид переходного процесса: с 20 % перерегулированием.

12. Выбираем регулятор по значениям $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = 0,107$ и $R_o = 0,31$, используя рис. 4.25. На основании расчета приходим к выводу, что для данной схемы регулирования пригодны все регуляторы, кроме И-регулятора.

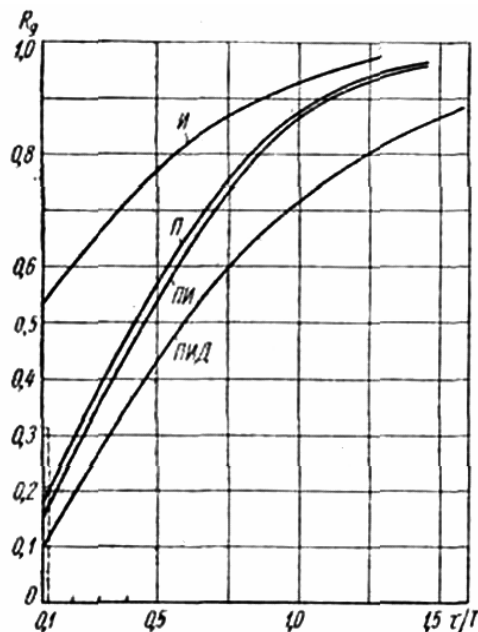


Рис. 4.25. Кривые выбора регулятора для переходного процесса с 20 % перерегулированием

Глава 5.

СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ

5.1. Классификация и назначение систем телемеханики

Телемеханикой называют область техники, охватывающую теорию и практику устройств передачи информации и управления на расстоянии. В ряде случаев функционально телемеханические системы дополняют системы автоматики, совместно решая общую задачу контроля и управления в системах ТГВ.

Следует различать две стадии телемеханизации: телемеханизацию централизованного контроля и телеавтоматизацию управления. В первом случае контроль и управление объектами, находящимися на расстоянии, сосредотачиваются в центральном пункте, однако само управление осуществляется человеком (диспетчерское управление). Для крупных объектов задачи диспетчерского управления настолько сложны, что возникают задачи автоматизации самого диспетчерского управления.

При телеавтоматизации, то есть органическом сочетании автоматизации и телемеханизации, из центрального пункта осуществляется автоматическая координация работ автоматизированных объектов, разделенных расстоянием и являющихся частью общей автоматизированной системы. В частности, телеавтоматизация может применяться совместно с управляющей машиной. В этом случае системы телемеханики вводят в управляющую машину информацию о ходе производственного процесса на отдельных участках и передают этим участкам команды, выработанные управляющей машиной.

Устройства телемеханики, применяемые в системах ТГВ, выполняют следующие функции: телеизмерение (ТИ) – передачу на расстояние значений величин, характеризующих режим работы контролируемых установок; телеуправление (ТУ) – передачу на расстояние импульсов управления, воздействующих на исполнительные механизмы управляемых установок; телесигнализацию (ТС) – передачу на расстояние сигналов о состоянии контролируемых объектов или служебных сигналов другого назначения.

Телеизмерение может осуществляться с помощью систем ближнего действия (на расстояниях до 15 км) и систем дальнего действия (на расстояниях до сотен километров, особенно в системах газоснабжения и больших тепловых сетей). В системах ближнего действия, основанных на методе интенсивности, измеряемая величина преобразуется в значение силы тока или напряжения, передаваемое по линии связи. В системах дальнего действия

измеряемая величина передается с помощью электрических импульсов постоянного тока или изменяющейся частоты переменного тока.

В системах ТГВ телеизмерение применяют для передачи значений параметров, характеризующих режим работы отдельных элементов и системы в целом на соответствующий диспетчерский пункт. К таким параметрам относятся: текущее значение температуры и влажности воздуха, давление газа, пара, горячей и холодной воды, расход воды, передаваемые по магистральным сетям; давление, развиваемое насосными агрегатами; давление в основных точках газовой, паровой или водяной сети, характеризующее состояние конкретной системы; уровень воды в резервуарах (баках-аккумуляторах) систем холодоснабжения и другие параметры.

Телеуправление позволяет с помощью передаваемых импульсов воздействовать на исполнительные механизмы управляемых объектов. Средства ТУ используют для пуска и остановки на расстоянии (из диспетчерского пункта) насосных агрегатов, закрытия, открытия и регулирования степени открытия задвижек, включения и отключения вентиляторов и др. Возможность осуществления этих операций на расстоянии позволяет диспетчеру без помощи дежурного персонала быстро вводить в действие или выводить из работы соответствующие агрегаты, когда этого требует режим работы системы в условиях нормальной эксплуатации. Кроме того, в аварийных условиях средства ТУ позволяют диспетчеру быстро производить необходимые переключения с целью локализации аварии (например, в газовых сетях).

Телесигнализация используется для автоматической передачи сигналов о состоянии определяющих параметров ТГВ, насосных агрегатов, задвижек, фильтров и других агрегатов котельных установок, систем теплогазоснабжения. С помощью средств ТС на мнемонической схеме системы, воспроизведенной на щите диспетчерского пункта, непрерывно указывается состояние элементов оборудования системы, а также любое изменение положения запорной или регулирующей арматуры либо изменение параметров, как в процессе нормальной эксплуатации, так и во время предаварийных или аварийных ситуаций. Это позволяет диспетчеру ориентироваться при производстве оперативных переключений, особенно во время аварии, не прибегая к телефонным переговорам с обслуживающим персоналом.

Важнейшее значение в телемеханике имеют следующие понятия.

Канал связи, с помощью которого осуществляется передача сигналов на расстояние. Кроме проводов и кабелей к каналам связи относят усилители, коммутаторы и фильтры. Канал связи должен обеспечивать наи-

меньшее искажение передаваемых сигналов. Следует различать понятия «канал связи» и «линия связи», поскольку по одной линии связи может быть создано несколько каналов связи для независимой передачи нескольких сообщений.

Сигнал – материальный носитель информации. Существует много методов создания сигналов в системах телемеханики, цель которых уменьшить искажения, возникающие из-за помех и изменения параметров канала связи.

Помехоустойчивость определяет способность системы осуществлять передачу сигналов при наличии помех. Система считается достаточно помехоустойчивой, если расхождение между отправленным и полученным сигналами не превышает заданной величины.

Особое значение имеют *точность, быстродействие, пропускная способность и надежность* систем телемеханики.

Выделим основные задачи телемеханики:

- передача большого числа сообщений по одной или ограниченному числу линий связи путем создания на этой линии каналов связи;
- преодоление технических затруднений, возникающих при передаче сигналов на расстояние вследствие действия различных помех, то есть обеспечение надежности контроля и управления на расстоянии.

Инженерные методы телемеханики базируются на получившей большое развитие современной теории информации, а также на математической теории анализа и синтеза релейно-контактных и бесконтактных схем.

5.1.1. Основные понятия о преобразовании информации

При управлении системами ТГВ всегда возникает необходимость в оперативных сообщениях о ходе процесса, которые требуется передавать от одного устройства управления к другому. Если под сообщением понимать все то, что передается о ходе процесса, то под информацией понимается та часть сообщения, которая представляет новизну, и ранее не была, известна получателю (оператору или управляющей машине).

Рассмотрим функциональную схему телемеханической системы на примере системы телеизмерения (рис. 5.1).

В исходном пункте контролируемая величина x измеряется датчиком 1 и преобразуется в однозначно связанную с x вспомогательную величину y_1 , называемую *первичным сигналом*. Кодировующее устройство 2 шифрует первичный сигнал, делая его отличным от других возможных сигналов (телеизмерительный сигнал y_2).

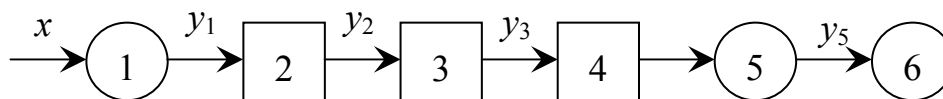


Рис. 5.1. Структурная схема телеизмерений

Зашифрованный сигнал поступает в передающее устройство 3, которое преобразует телеизмерительный сигнал в *линейный* (y_3), то есть в сигнал, более удобный для передачи по линии связи. В приемном устройстве 4 линейный сигнал демодулируется, то есть преобразуется в сигнал телеизмерения y_4 , поступающий в декодирующее устройство 5, которое расшифровывает сигнал, преобразуя его в выходной, воздействующий на индикаторы контролируемых параметров 6, фиксирующие или регистрирующие их значения.

В системах телеуправления и телесигнализации передача информации производится аналогичным образом.

Рассмотрим задачи, решаемые основными узлами телемеханической системы.

Для образования телемеханического сигнала используются электромагнитные колебания в виде переменного тока или импульсов. *Импульсы*, используемые в телемеханике, показаны на рис. 5.2. Импульсы постоянного тока или напряжения называют *видеоимпульсами* (рис. 5.2, а) в отличие от радиоимпульсов или импульсов переменного тока, которые образуются при заполнении импульсов постоянного тока высокочастотными колебаниями (рис. 5.2, б).

При использовании гармонического колебания мы получаем непрерывный сигнал, при подаче информации с помощью импульсов – дискретный. Передача дискретных сигналов во многих случаях оказывается более удобной и надежной. Это объясняется следующим: дискретные сигналы в меньшей степени подвержены искажениям в процессе передачи; эти искажения легче обнаружить; информация, полученная в дискретной форме, достаточно просто вводится в вычислительное устройство и легко поддается цифровой индикации.

Кодирование – это преобразование сообщения в дискретный сигнал в виде кодовых комбинаций. Обратный процесс (декодирование), осуществляемый на приемной стороне телемеханической системы, должен однозначно восстановить передаваемое сообщение.

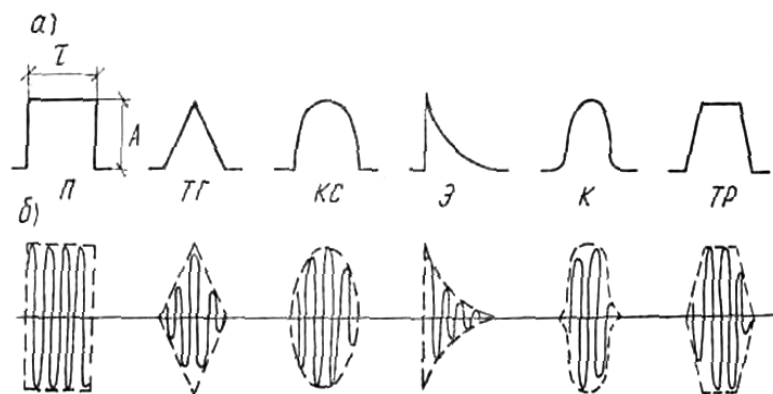


Рис. 5.2. Формы импульсов: а) видеоимпульсы; б) радиоимпульсы;
 П – прямоугольный; ТГ – треугольный; КС – синусоидальный;
 Э – экспоненциальный; К – колокольный; ТР – трапецеидальный

В телемеханике для формирования сигналов применяется как одноэлементное, так и многоэлементное кодирование. Используя одноэлементное кодирование, можно получить ограниченное число сигналов (в соответствии с небольшим количеством признаков одного элемента). Однако оно широко используется в телеуправлении, так как большинство телеуправляемых объектов является двухпозиционным, то есть для управления ими требуется передача только двух команд («включить» и «отключить»).

В тех случаях, когда число управляемых объектов велико или каждому объекту необходимо передавать несколько сигналов, прибегают к многоэлементному кодированию. Сигнал, сформированный с помощью многоэлементного кодирования, обычно включает в себя не только содержание команды, но и адрес, то есть номер объекта, которому передается команда.

При многоэлементном кодировании сообщение передается в виде кодовой информации, составленной из определенного числа символов или признаков. Количество признаков называют основанием кода. Если основание кода равно двум (например, 0 и 1), то такие коды называются двоичными (бинарными), или двухпозиционными. Коды, у которых основание больше или равно 3, называются многопозиционными (троичными, четверичными и т. п.). В настоящее время, в подавляющем большинстве случаев применяются двоичные коды.

С точки зрения достоверности передаваемой информации, наиболее важной является классификация кодов **по возможности обнаружения и исправления ошибок**. По этому признаку коды можно разделить на *помехоустойчивые* (не обнаруживающие искажения) и *помехозащищенные* (обнаруживающие искажения и обнаруживающие и исправляющие искажения).

Отличительной особенностью помехозащищенных кодов является наличие в их составе кодовых комбинаций, которые отличаются друг от друга лишь в одном разряде. Типичным кодом такого типа является двоичный код на все сочетания. Например, комбинация 101 и 001 отличаются лишь в старшем разряде.

Помехозащищенные (корректирующие) коды делятся на две группы: коды с обнаружением ошибок и коды с обнаружением и исправлением ошибок. Построение *помехоустойчивого* кода связано с недоиспользованием кодовых комбинаций, приводящим к так называемой избыточности. *Избыточность* означает, что из исходных символов можно построить больше комбинаций, чем их используется в данном коде. При построении такого кода информационными являются не все символы, часть их (избыточные) выполняют контрольные функции. К кодам с обнаружением ошибок относятся коды с проверкой на четность (или нечетность), распределительный, инверсный, корреляционный и другие. Добавление избыточных элементов к этим кодам приводит к дальнейшему повышению помехоустойчивости и возможности получить коды с исправлением

Образованный операцией кодирования телемеханический сигнал должен быть преобразован с целью придания ему некоторых физических свойств, необходимых для передачи по линии связи. Одним из методов такого преобразования является модуляция.

Модуляцией называется процесс изменения параметра переносчика информации в соответствии с передаваемым сообщением. В качестве переносчиков информации используются либо высокочастотное гармоническое колебание (при непрерывной модуляции), либо непрерывная последовательность импульсов (импульсная модуляция)

В зависимости от модулируемого параметра различают амплитудную модуляцию (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ).

Применение модуляции расширяет возможности передачи сообщений, что обусловлено следующими факторами:

- увеличивается число сообщений, которые могут передаваться по одной линии связи путем использования частотного разделения сигналов;
- повышается достоверность передаваемых сигналов при использовании помехоустойчивых типов модуляции;
- повышается эффективность передачи, так как практически любой тип модуляции сопровождается перенесением спектра сигнала в более высокочастотную область.

Импульсная модуляция обладает большими возможностями повышения помехоустойчивости и эффективности, чем непрерывная.

5.2. Системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации

5.2.1. Системы телеизмерения ближнего и дальнего действия

Системы телеизмерения предназначены для автоматических измерений параметров на расстоянии через каналы связи. Устройства телеизмерений принято называть по методу передачи сигналов через канал связи, то есть по способу модуляции и кодирования, которыми передается значение измеряемого параметра.

В **системах ближнего действия** для передачи сигналов на расстояния до 15 км применяется амплитудная модуляция. Для уменьшения потери энергии в линии в качестве переносчика информации используется постоянный ток, так как в этом случае на уровне сигнала не будут сказываться индуктивность и емкость проводов. Такие системы называются *системами интенсивности*.

В **системах дальнего действия** используются методы импульсной и частотной передачи сигнала, так как при изменении амплитуды сигнала вследствие затухания в линии связи частота сигнала и такие параметры, как длительность импульса или его задержка, в известных пределах не изменяются.

Рассмотрим две схемы телеизмерения ближнего и дальнего действия.

Телеизмерительная схема интенсивности тока ближнего действия с реостатным датчиком D (рис. 5.3) основана на использовании перемещения ползунка P реостата R измерительным прибором $ИП$ одновременно со стрелкой на угол α_u . Изменение силы тока в линии связи $ЛС$, пропорциональное измеряемой величине, фиксируется вторичным прибором $ВП$. Для снижения влияния изменения сопротивления линии связи $ЛС$ включается балансное сопротивление R_6 , значительно превышающее сопротивление проводов.

Так как для передвижения ползунка P требуется относительно большое усилие, эта схема применяется для измерения расхода, давления, уровня и других величин, при контроле которых измерительные приборы развивают значительные вращающие моменты.

Время-импульсная схема телеизмерения дальнего действия представлена на рис. 5.4. Принцип действия этой схемы основан на посыл-

ке сигналов в виде импульсов определенной продолжительности или на использовании пауз разной продолжительности между двумя импульсами.

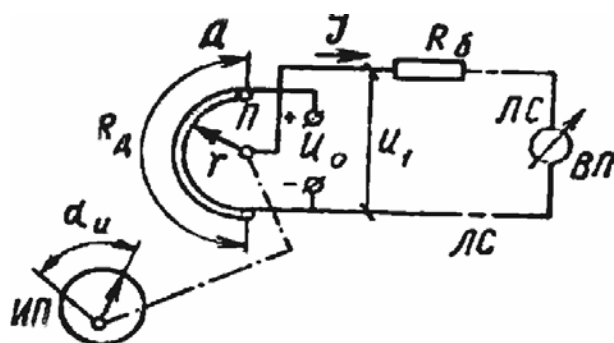


Рис. 5.3. Телеизмерительная схема интенсивности с реостатным датчиком

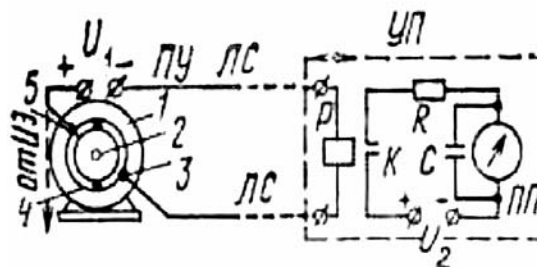


Рис. 5.4. Время-импульсная схема телеизмерения дальнего действия

Передающее устройство ПУ представляет собой синхронный двигатель 1, на вал 2 которого насажены два медных полукольца 4, изолированных между собой. От вала к полукольцам 4 прикасаются две металлические или графитовые щетки: одна из них 3 неподвижна, а другая 5 имеет кинематическую связь с измерительным прибором ИЭ. К щеткам подключается линией связи реле Р приемного устройства УП, использующего миллиамперметр МП магнитоэлектрической системы.

В процессе работы синхронный двигатель непрерывно вращается с постоянной скоростью. Когда щетка 5 находится в одной плоскости с щеткой 3 (как показано на рис. 5.4), вращающиеся полукольца 4 не могут замкнуть цепь питания линии связи ЛС от сети с напряжением U_1 , то линия связи ЛС обесточена. При отклонении измеряемого параметра щетка 5 перемещается по полукольцу 4 к щетке 3. В связи с этим в линию связи ЛС посылаются импульсы, продолжительность которых пропорциональна степени перемещения щетки 5 или величине измеряемого параметра.

В приемном устройстве УП реле Р при замыкании своих контактов К посылает к прибору МП импульсы тока или напряжения такой же продолжительности, как и импульсы в линии связи ЛС. Шкала прибора, измеряющая среднее значение импульсов тока, градуируется в единицах измеряемой величины. Сопротивление устройства УП ограничивает ток в цепи миллиамперметра, а конденсатор С является фильтром.

5.2.2. Системы телеуправления и телесигнализации

Основным отличием систем телеуправления от систем дистанционного и местного управления является передача большого количества

сигналов по значительно меньшему числу линий связи. Системы телеуправления обычно снабжаются обратной сигнализацией, осуществляемой по той же линии связи и подтверждающей выполнение объектами посылаемых им приказов, а также элементами, защищающими управляемые объекты от выполнения так называемых ложных, случайных приказов. Такие системы называются системами телеуправления и телесигнализации.

Способность систем телеуправления выбирать из большого количества посылаемых сигналов один какой-то сигнал определенного вида, требующийся для управления данным объектом, называется *избирательностью*.

В **многопроводных системах** телеуправления несколько различных сигналов посылается по нескольким линиям связи одновременно. Их основным достоинством является небольшой период времени, необходимый на передачу каждого отдельного сигнала, так как сигналы могут передаваться параллельно во времени.

В **малопроводных системах** телеуправления сигналы посылаются последовательно по времени (поочередно). Основное достоинство этих систем – экономичность вследствие сокращения числа линий связи.

Существующие устройства телеуправления по виду раздельной передачи сигналов или методу избирания и устройству линий связи можно разделить на три группы (рис. 5.5):

- 1) устройства телеуправления со схемным разделением сигналов или многопроводные устройства;
- 2) устройства с частотным разделением сигналов;
- 3) устройства с временным разделением сигналов.

Многопроводные устройства ТУ-ТС (рис. 5.5, *а*) обычно применяются при сравнительно небольших расстояниях между пунктом управления и объектом управления. При наличии n самостоятельных проводов (кроме общего провода питания) по многопроводной системе можно передать N сигналов:

$$N = Kn,$$

где K – число импульсных признаков; обычно $K = 2 \dots 4$.

В многопроводных устройствах передача всех импульсов может происходить одновременно, ибо для каждого импульса используется отдельная электрическая цепь. Для разделения импульсов управления и сигнализации применяется амплитудный признак, при котором сила тока управления в несколько раз превышает силу тока сигнализации.

Малопроводные устройства ТУ-ТС с частотным разделением сигналов (рис. 5.5, б) обеспечивают передачу различных сигналов по одной линии связи за счет использования посылок тока разной частоты. В передающей части этих устройств имеется генератор синусоидальных колебаний разной частоты; в приемной части сигналы разделяются с помощью полосовых фильтров. Иногда для увеличения числа передаваемых сигналов вводят передачу каждого сигнала двумя частотами с соответствующей их комбинацией.

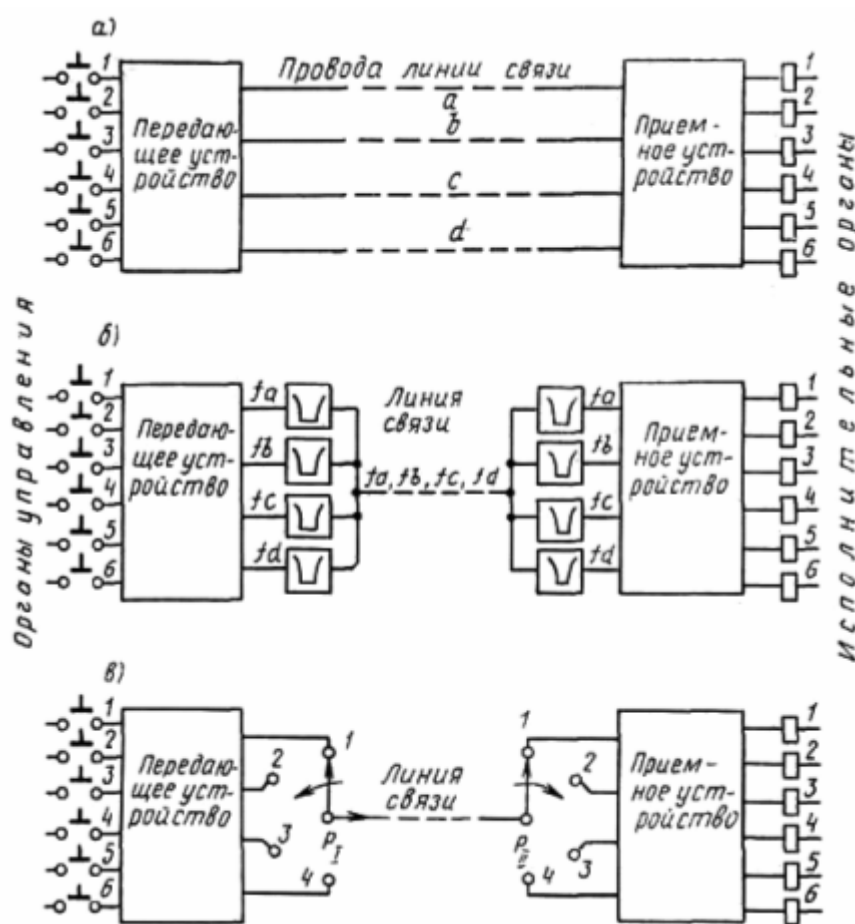


Рис. 5.5. Принципиальные схемы устройств телеуправления:

- а) многопроводное устройство с разделением сигналов по электрическим цепям;
 б) и в) малопроводные устройства с частотным и временным разделением сигналов

Малопроводные устройства ТУ-ТС с временным разделением сигналов (рис. 5.5, в) осуществляют передачу сигналов по одной линии связи в виде поочередной посылки импульсов с помощью распределителей. Два синхронно работающих распределителя P_1 и P_2 одновременно подключают линию связи к соответствующим управляющим и управляемым элементам схемы.

В качестве распределителей в системах телеуправления используются переключатели, приводимые в действие электродвигателями, электромагнитные шаговые распределители, релейные, катодные и бесконтактные переключатели.

Шаговые распределители широко применяются в системах телеуправления, так как они просты по устройству и имеют небольшую стоимость. Недостатками их являются относительно невысокая скорость переключения и наличие вращающихся частей.

В настоящее время применяют более совершенные бесконтактные переключатели, которые представляют собой цепочку бесконтактных элементов (например, триггерных ячеек), последовательно переключающихся при поступлении очередного импульса.

В системах газоснабжения широко применяется телемеханический комплекс «Ритм-1». Он предназначен для телемеханизации городских и промышленных систем газоснабжения и представляет собой телемеханическую систему циклического действия для рассредоточенных объектов контроля и управления [9].

5.3. Условно-графическое обозначение приборов и средств автоматизации на функциональных схемах

Цель: ознакомиться с условно-графическим обозначением приборов и средств автоматизации на функциональных схемах.

Основным техническим документом, показывающим связи между технологическим процессом и средствами контроля и управления, является функциональная схема автоматизации, на которой с помощью условных изображений схематически показывают технологическое оборудование, трубопроводы и средства автоматизации.

На функциональных схемах автоматизации условно показывают все средства, используемые для автоматического управления процессом, кроме вспомогательной аппаратуры.

Для изображения автоматических устройств используют ГОСТ 21.404-85 «Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах».

Ниже приводятся основные положения ГОСТ 21.404-85.

Условные графические обозначения средств автоматизации приведены в приложении (прил., табл. П.1.).

Условные графические обозначения электроаппаратуры, применяемые в функциональных схемах автоматизации, следует изображать в соответствии со стандартами или правилами (прил., табл. П.2). При отсутствии стандартных словных обозначений каких-либо автоматических устройств следует принять свои обозначения и пояснить их на схеме. Толщина линий этих обозначений должна быть 0,5...0,6 мм, кроме горизонтальной разделительной линии в условном изображении прибора, устанавливаемого на щите, толщина которой 0,2...0,3 мм.

Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов изображают сплошной тонкой линией, соединяющей технологический трубопровод или аппарат с прибором (рис. 5.6, а). При необходимости указания конкретного места расположения отборного устройства или точки измерения (внутри графического обозначения технологического аппарата) в конце тонкой линии изображают окружность диаметром 2 мм. (рис. 5.6, б).

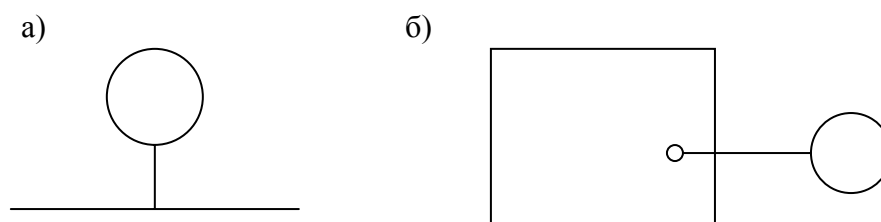


Рис. 5.6. Отборное устройство: а) для постоянно подключенных приборов; б) с указанием конкретного места расположения

Комплектующие устройства (машины централизованного контроля, управляющие машины, полукомплекты телемеханики) обозначают прямоугольником произвольных размеров с указанием внутри прямоугольника типа устройства (по документам завода-изготовителя).

При формировании условного обозначения прибора в верхнюю половину окружности, обозначающей элемент измерительной цепи или регулятор, сначала записывают обозначения измеряемых или регулируемых параметров (см. прил. табл. П.3) и, если это необходимо, их уточнение (см. прил. табл. 4), а затем – обозначения основных функций, выполняемых этим устройством (см. прил. табл. П.5). В нижней части окружности располагают позиционное обозначение его (буквенно-цифровое или цифровое). На рис. 5.7 приведен пример построения условного обозначения прибора для измерения, регистрации и регулирования перепада давлений.

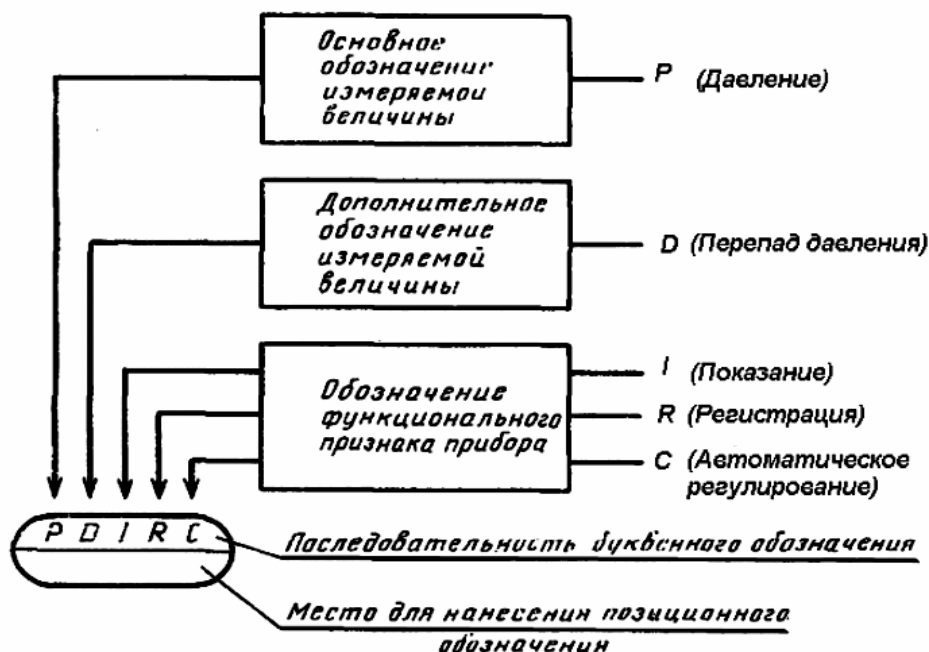


Рис. 5.7. Пример построения условного обозначения прибора

При построении обозначений комплектов средств автоматизации первая буква в обозначении каждого входящего в комплект прибора или устройства (кроме устройств ручного управления) является наименованием измеряемой комплектом величины.

Буквенные обозначения устройств, выполненных в виде отдельных блоков и предназначенных для ручных операций, независимо от того, в состав какого комплекта они входят, должны начинаться с буквы **Н**.

Порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков прибора принимают с соблюдением последовательности обозначений: **I, R, C, S, A**.

При построении буквенных обозначений указывают не все функциональные признаки прибора, а лишь те, которые используют в данной схеме.

Букву **A** применяют для обозначения функции «сигнализация» независимо от того, вынесена ли сигнальная аппаратура на какой-либо щит или для сигнализации используются лампы, встроенные в сам прибор.

Букву **S** применяют для обозначения контактного устройства прибора, используемого только для включения, отключения, переключения, блокировки.

При применении контактного устройства прибора для включения, отключения и одновременно для сигнализации в обозначении прибора используют обе буквы: **S** и **A**.

Предельные значения измеряемых величин, по которым осуществляется, например, включение, отключение, блокировка, сигнализация, допускается конкретизировать добавлением букв *H* и *L*. Эти буквы наносят справа от графического обозначения.

Для обозначения измеряемых величин, не предусмотренных данным стандартом, допускается использовать резервные буквы: *A, B, C, I, J, N, O, Y, Z* (буква *X* – не рекомендуется). Используемые резервные буквы должны быть расшифрованы на свободном поле схеме [4], [6], [10].

При разработке функциональных схем применяют два способа построения условных графических обозначений автоматических устройств: упрощенный и развернутый.

При *упрощенном методе* построения приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции, например, контроль, регулирование, сигнализацию и выполненные в виде отдельных блоков изображают одним условным обозначением. При этом первичные измерительные преобразователи и всю вспомогательную аппаратуру не изображают.

При *развернутом методе* построения каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект средств автоматизации, указывают отдельным условным обозначением. Сложные приборы, выполняющие несколько функций, разрешается изображать несколькими окружностями, расположенными слитно [6]. Обозначение аппаратуры помещают в нижней части листа. При этом вдоль листа вычерчивают прямоугольники произвольных размеров (толщина линий 0,5...1 мм), условно изображающие щиты, пульта, шкафы. Число их должно соответствовать действительному. В каждом прямоугольнике помещают обозначение аппаратуры, установленной на соответствующем этому прямоугольнику щите (пульте, шкафе). Для первичных приборов, устанавливаемых непосредственно у технологического оборудования (например, дифманометров), предусматривают отдельный прямоугольник. Прямоугольники рекомендуется располагать в такой последовательности (сверху вниз): приборы местные (установленные без шкафов и щитов); шкафы местных приборов или щиты (пульта) местного управления; щит (пульт) измерительных (вторичных) приборов; щит (пульт) блоков и преобразователей; щит (пульт) сигнализации или графопанель.

Развернутый способ построения условных обозначений более полно раскрывает решения по автоматизации, поэтому им пользуются чаще. Пример выполнения построения условных графических обозначений автоматических устройств этим способом дан в приложении (прил., рис. П.1).

5.4. Принципы построения управляющих вычислительных комплексов

Управление является необходимой функцией большинства технологических процессов, в результате которых из сырья под действием энергии получается целевой продукт. На ранних стадиях развития производства работник, исходя из своего опыта, принимал решения по управлению и регулировал подачу сырья и энергии. Он был замыкающим звеном контура управления. По мере усложнения технологических процессов работник оказывался все менее способным справиться с задачей управления.

Идея использования вычислительной техники для целей управления технологическими процессами возникла еще в 50-е года прошлого столетия. Система управления технологическим процессом на базе ЭВМ эффективна потому, что поддерживает параметры процесса в режиме, близком к оптимальному. В результате сокращается расход материалов, энергии, повышаются производительность труда и качество продукции, обеспечивается быстрая перестройка оборудования на выпуск другого ее вида. Для управления производственными процессами используются управляющие вычислительные комплексы (УВК).

На протяжении многих лет, начиная с 60-х годов XX века, в качестве основы УВК использовались малые или мини-ЭВМ. ЭВМ этой категории обладали достаточной производительностью для управления технологическими процессами при существенно меньшей стоимости по сравнению с большими универсальными ЭВМ. Появление микропроцессоров и микро-ЭВМ привело к существенному расширению сферы применения УВК. Чтобы выполнять функции УВК, базовая ЭВМ дополняется специальными техническими и программными средствами.

Управляющий вычислительный комплекс имеет два принципиальных отличия от универсальных ЭВМ. Во-первых, он через датчики и регулирующие органы осуществляет непосредственную связь с объектом управления. Во-вторых, УВК должен своевременно откликаться на события, происходящие в объекте управления, с которым он взаимодействует, работать в одном темпе с объектом управления, то есть в реальном времени. Реальное время – понятие относительное и зависит от темпа протекающих процессов.

Упрощенная структурная схема УВК показана на рис. 5.8.

Комплекс взаимодействует с внешней средой через устройства связи с объектом (УСО) – устройства аналогового и цифрового ввода и вывода.

Физические величины, отображающие протекание технологического процесса (например, его температура), носят преимущественно аналоговый характер. Аналоговый сигнал для передачи в ЭВМ должен быть преобразован в цифровую форму. Преобразование аналоговых величин в цифровые величины осуществляется устройством аналогового ввода.

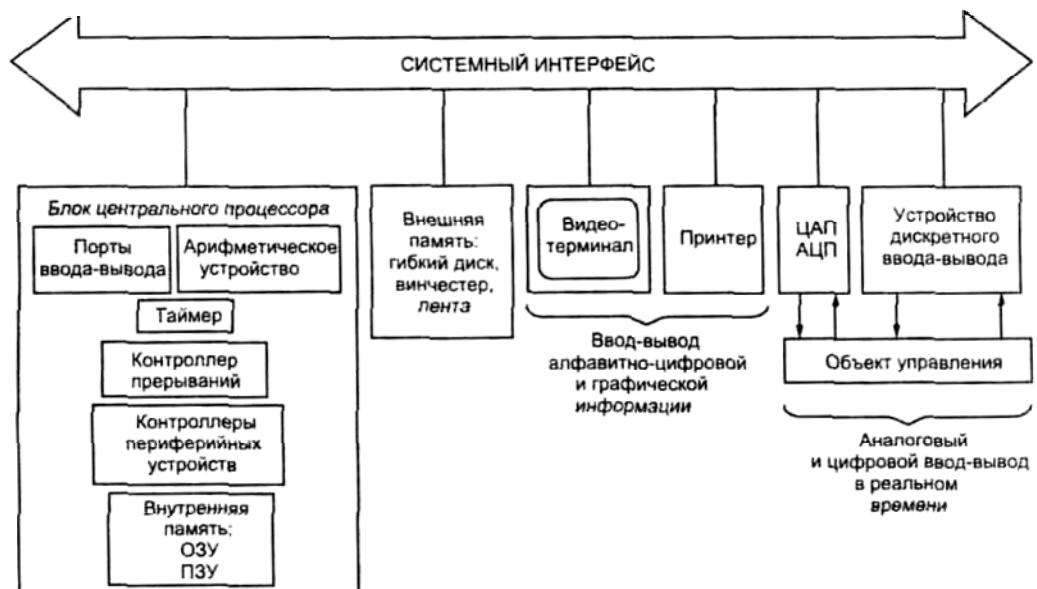


Рис. 5.8. Структурная схема УВК

Обобщенная структура устройства аналогового ввода представлена на рис. 5.9. Физическая величина преобразуется датчиком в электрическую величину. Датчиками с электрическим выходом являются, например, термомпары и термосопротивления, измеряющие температуру. Цифровое представление аналогового сигнала обеспечивают аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

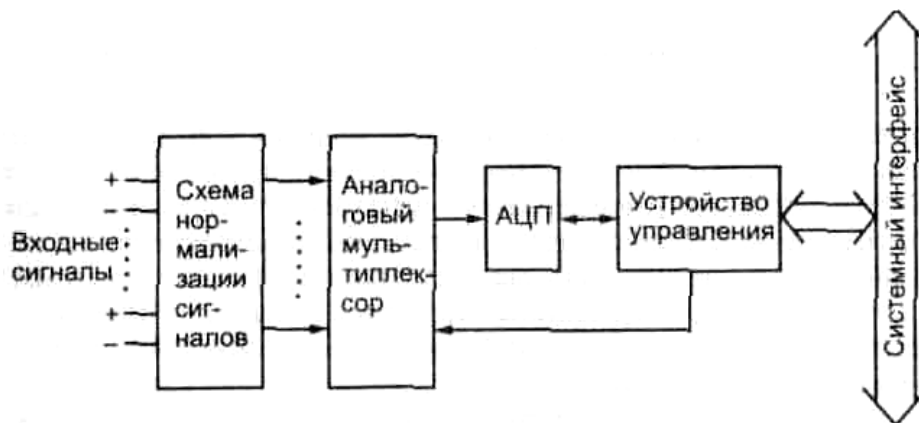


Рис. 5.9. Структурная схема устройства аналогового ввода

Поскольку уровни сигналов датчиков, как правило, не соответствуют требованиям преобразователя, устройства аналогового ввода дополняются обычно средствами нормирования сигнала, в качестве которых используются аттенюаторы, фильтры и т. д. Для поочередного подключения входных сигналов к АЦП используется мультиплексор. Исполнительные устройства, управляющие технологическим процессом, являются, как правило, аналоговыми. Сопряжение между УВК и исполнительными аналоговыми устройствами осуществляется устройствами аналогового вывода (рис. 5.10).

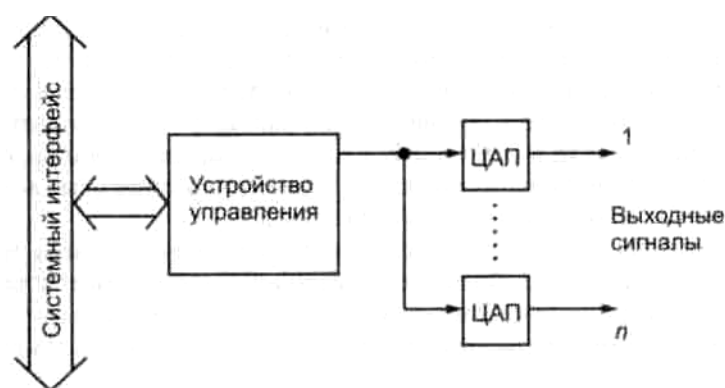


Рис. 5.10. Структурная схема устройства аналогового вывода

Аналоговое представление сигнала обеспечивается цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП), вырабатывающими аналоговый сигнал, пропорциональный цифровому значению, поступившему от ЭВМ. Устройство управления обеспечивает связь с центральным процессором (ЦП) и передачу данных в ЦАП. Выходной величиной ЦАП является аналоговый сигнал напряжения или тока, пропорциональный входному цифровому сигналу. Выходной сигнал приводится к виду, требуемому для управления исполнительными устройствами.

Информация о технологическом процессе может быть представлена не только аналоговыми сигналами, но также сигналами, принимающими дискретные значения. В некоторых технологических процессах используются датчики импульсов. Электрический импульс, регистрируемый счетчиком, может указывать на какое-либо событие или являться известной мерой какой-либо величины. Может также использоваться дискретный сигнал, соответствующий состоянию контактов включено – выключено (состояние двигателя, реле и т. д.) или в пределах – вне пределов, отражаемому разрядом входного регистра.

Основная функция устройства дискретного ввода (рис. 5.11) – регистрация или подсчет двоичных сигналов, возникающих в технологическом процессе. Схемы нормализации сигнала преобразуют входные сигналы, представленные в виде тока или положения переключателя, в сигналы напряжения и содержат помехозащитную пороговую схему, выходное напряжение которой соответствует логической единице, если входное напряжение превышает некоторый порог. Устройство управления обеспечивает связь с ЦП и формирование внутренних управляющих сигналов.



Рис. 5.11. Структурная схема дискретного ввода

В ряде случаев управление технологическим процессом требует наличия как аналоговых, так и цифровых выходов. Некоторые исполнительные механизмы, например шаговый двигатель, управляются не аналоговой электрической величиной, а электрическими импульсами. При этом устройство вывода вырабатывает последовательность управляющих электрических импульсов, количество и параметры которых задаются программой УВК.

Обобщенная структура устройства вывода дискретных сигналов представлена на рис. 5.12.

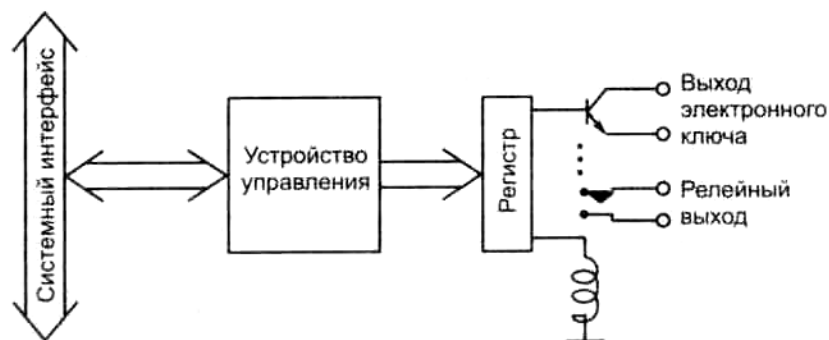


Рис. 5.12. Структурная схема устройства дискретного вывода

Основная функция таких устройств – функция ключа, управляющего источником напряжения или тока. Это может быть полупроводниковый ключ для коммутации нагрузки малой мощности с высокой скоростью или релейный ключ для коммутации мощной нагрузки при относительно малых скоростях переключения. Длительность замыкания ключа и число импульсов могут программироваться. Каждый бит выходного регистра может использоваться независимо для управления каким-либо технологическим оборудованием.

Управляющий вычислительный комплекс должен быстро реагировать на события, происходящие в управляемом технологическом процессе. Момент появления этих событий заранее неизвестен; он не может быть предусмотрен ни оператором, ни программистом, описывающим алгоритм управления. Возможность реакции на внешние события обеспечивается системой прерывания. Датчики, регистрирующие события на объекте, передают информацию в модули УСО, которые посылают в УВК запрос на прерывание. При поступлении сигналов, оповещающих о необходимости реакции УВК на события в управляемом процессе, УВК прерывает работу текущей программы и переходит к выполнению программы, предназначенной для обработки данного события. После выдачи необходимого воздействия на объект управления УВК возобновляет выполнение прерванной программы. Наличие системы прерываний – важная архитектурная особенность УВК.

Работа в реальном времени предполагает использование времени как параметра управления процессом. Управляющие воздействия должны быть выданы через определенное время после появления каких-либо событий в технологическом процессе. Для реализации функций, связанных с отсчетом времени, используются или программируемый таймер, или «часы реального времени», показания которых определяют моменты времени для выполнения управляющих воздействий.

На рис. 5.13 приведена структурная схема включения УВК в замкнутый контур управления технологическим процессом. Управление осуществляется на основе математической модели технологического процесса, которая разрабатывается в результате всестороннего изучения поведения процесса и его реакции на управляющие воздействия. Модель процесса служит основой для разработки алгоритма управления – процедуры расчета управляющих воздействий. Значения сигналов, поступающих от датчиков технологического процесса, являются входами алгоритма управления. В соответствии с этим алгоритмом создается программа, вычисляющая

значения управляющих воздействий, которые реализуются исполнительными механизмами.



Рис. 5.13. УВК в контуре управления технологическим процессом:
 $x_1 \dots x_n$ – параметры процесса; $y_1 \dots y_n$ – управляющие воздействия;
 D – датчики, $ИМ$ – исполнительные механизмы

Эксплуатируются УВК в основном в производственных условиях. В этой связи конструктивной особенностью УВК является пылезащитный и сейсмостойкий корпус, защищающий их при работе в неблагоприятных условиях внешней среды от механических ударов и вибраций, повышенной влажности, запыленности и т. д. Характерным для УВК является модульный конструктивный принцип, обеспечивающий удобство обслуживания и ремонта. Эти комплексы имеют намного большее, чем у офисных компьютеров, количество слотов расширения, что позволяет обслуживать большое количество датчиков и исполнительных устройств. В отличие от офисных компьютеров в УВК платы расширения устанавливаются не на системную (материнскую) плату (что непригодно для промышленных условий), а на пассивную объединительную панель, содержащую только слоты расширения. Системная плата – модуль ЦП – так же, как и модули устройств ввода-вывода, вставляется в слот пассивной объединительной панели. Такая компоновка позволяет снизить механические нагрузки на системную плату и существенно повысить надежность УВК.

УВК используют специализированное программное обеспечение – операционные системы реального времени, главная задача которых состоит в быстрой реакции на события, происходящие в управляемом объекте.

К управляющему комплексу предъявляются более жесткие требования по надежности, чем к универсальным ЭВМ, используемым для научно-технических расчетов, поскольку ложное решение, принимаемое машиной, может привести к аварии на управляемом объекте. Надежность можно считать основным критерием качества УВК. Проблема обеспечения надежности УВК требует решения на всех этапах его проектирования и производства. Требования к надежности управляющей вычислительной техники обычно задаются на уровне требований к надежности основного технологического оборудования, для управления которым она используется.

В особо ответственных промышленных АСУТП с режимом эксплуатации, не допускающим перерывов в работе, УВК должны быть отказоустойчивыми, то есть продолжать работу без снижения производительности в случае, когда в их аппаратных или программных средствах возникают отказы или сбои. Они должны обеспечить безошибочную работу технологического процесса без его остановки или нарушения, во избежание возможных технологических и экономических потерь.

5.5. Назначение и общая характеристика промышленных контроллеров

Возрастающая сложность объектов управления и контроля, повышение требований к точности и надежности их работы, значительный объем информации, обрабатываемой по достаточно сложным алгоритмам в малые интервалы времени – предъявляют все более высокие требования к производительности и надежности автоматизированных управляющих систем.

В централизованных системах управления функции сбора, обработки и представления технологической информации выполнялись ЭВМ (например, микроЭВМ семейства СМ18ХХ) с соответствующим набором модулей УСО. Это требовало большого числа кабельных связей между устройствами сбора и обработки информации, с одной стороны, и исполнительными устройствами – с другой. Длина каждого канала в этом случае могла составлять десятки и сотни метров.

Распределенная система управления предполагает использование на нижнем уровне управления интеллектуальных *программируемых промышленных контроллеров* (ПК) или, согласно международной терминологии, программируемых логических контроллеров (ПЛК, PLC), реализующих функции сбора, а также логической и арифметической обработки информации в непосредственной близости от объекта управления и контроля.

Специализированные контроллеры с ограниченным числом каналов ввода-вывода (порядка 10) и малой вычислительной мощностью получили название *моноблоков*.

Функции представления технологической информации, обобщения и анализа информации, поступающей с ПК, реализуются на более высоком уровне управления посредством УВК или ПЭВМ. Такая ЭВМ должна иметь достаточные производительность для выполнения прикладных программ АСУТП и объем памяти для хранения указанных программ и графических пакетов. На этом уровне должна быть создана возможность подключения к ЭВМ графических видеомониторов, дополнительных терминалов, а также средств сопряжения с другими ЭВМ. Средства сопряжения должны обеспечивать передачу команд, слов состояний и технологической информации между ЭВМ и ПК.

При решении большинства ответственных задач управления использование УВК (например, на базе микроконтроллера СМ1820М.ВУ) приносит существенно больший эффект, чем ПЭВМ.

Центральная станция (УВК или ПЭВМ) обслуживает множество промышленных контроллеров, объединенных через последовательный интерфейс типа Bitbus, Profibus и т. п. При этом центральная станция выполняет функцию диспетчера локальной сети, а также функции сбора, анализа и управления в реальном времени для такой распределенной системы. Используя сетевой интерфейс, центральная станция обращается к серверу за необходимыми ресурсами – файлами, печатью, базами данных и т. д.

Таким образом, при использовании в распределенных системах управления интеллектуальных ПК появляется возможность перераспределения функций обработки информации и управления между нижним (ПК) и верхним (УВК или ПЭВМ) уровнями управления. При этом повышается суммарная производительность системы по сравнению с централизованной за счет распараллеливания функций обработки информации между ПК и УВК, что может, например, привести к сокращению времени реакции на события.

Отметим современные тенденции построения промышленных контроллеров:

- повышение интеллектуальных возможностей контроллера: увеличение производительности процессора и объема оперативной памяти, использование flash-памяти, выход в локальные сети Ethernet, Profibus, Canbus и другие, применение многозадачных систем реального времени – RTK (Real Time Kernel), QNX, MS Windows NT и т. д.;
- возможность простой реконфигурации каналов ввода-вывода;

- пылевлагозащищенное, вибропрочное и ударопрочное исполнение;
- работа в широком диапазоне температур (от минус 40 до + 70 °С);
- отсутствие механических устройств (накопителей на дисках, вентиляторов);
- высокая степень электромагнитной совместимости;
- приближение контроллеров к датчикам и исполнительным органам нижнего уровня автоматизации;
- возможность автономного выполнения задач обработки информации и управления при выходе из строя машин верхнего уровня.

Все это позволяет оптимальным образом применять однотипные контроллеры в самых различных областях народного хозяйства; при этом существенно улучшаются потребительские свойства контроллеров – производительность, стоимость, надежность.

Сфера использования промышленных контроллеров охватывает разнообразные области:

- гибкие производственные системы машиностроительных предприятий;
- системы управления технологическим процессом с непрерывным характером производства;
- управление объектами энергетики;
- управление измерительными системами и т. д.

Базовые функции промышленного контроллера показаны на рис. 5.14.



Рис. 5.14. Базовые функции промышленного контроллера

Промышленные контроллеры являются массовой продукцией управляющей вычислительной техники, при этом с развитием производства их номенклатура постоянно растет, а применение расширяется.

Отметим, что, поскольку специфические требования потребителей промышленных контроллеров весьма разнообразны, отечественные изделия могут успешно конкурировать на внутреннем рынке с зарубежными.

5.5.1. Аппаратные средства промышленных контроллеров

Промышленный контроллер, являясь автономным программируемым устройством сбора и обработки информации, как правило, содержит:

- процессор;
- память;
- средства коммуникации;
- устройства ввода данных от датчиков и вывода управляющих воздействий на исполнительные органы;
- средства индикации.

Специфика промышленного контроллера как управляющего вычислительного устройства обуславливает следующие требования, которым должны удовлетворять ПК:

- повышенная надежность;
- минимальное потребление энергии и рассеяние тепла в условиях ограниченной мощности источника питания и отсутствия элементов принудительной вентиляции и охлаждения;
- обеспечение высокой реактивности на запросы обслуживания со стороны объекта управления.

Процессорные модули ПК могут строиться на основе широкой гаммы микропроцессоров (преимущественно в КМОП-исполнении – Intel 80C32, Siemens SAB 80C166 и другие), выбор которых зависит от технико-экономических требований, предъявляемых к распределенной системе управления. При этом быстродействие процессора как таковое не является самоценным качеством, а должно оцениваться возможностью реализации процессором алгоритма управления технологическим процессом в реальном времени.

Память ПК обеспечивает хранение ядра операционной системы реального времени, необходимых утилит и прикладных программ управления объектом. В ней используются микросхемы постоянной, программируемой и оперативной памяти (последняя обеспечивает хранение промежуточных результатов и загружаемых прикладных управляющих программ).

Средства коммуникации ПК реализуют дистанционную загрузку задач и оперативный обмен данными между ПК, рабочими станциями операторов и УВК верхних уровней на расстоянии от сотен метров до нескольких километров со скоростями, соответствующими требованиям реактивности системы управления. Средства интерфейса с оператором выполняются с учетом производственных условий эксплуатации: мониторы имеют противоударный корпус с прочной пылевлагозащищенной передней панелью; в клавиатурах используется ограниченный набор функциональных и алфавитно-цифровых клавиш, обязательно предусматривается пылевлагозащита. Обмен данными между ПК и УВК верхних уровней может осуществляться по витой паре проводов, коаксиальному кабелю, оптоволоконному кабелю (особенно при работе в производственных условиях с высоким уровнем электромагнитных помех) или беспроводному каналу передачи данных.

Устройства ввода данных и вывода управляющих воздействий предполагают работу с дискретными и аналоговыми сигналами от датчиков исполнительных механизмов объекта управления. Они реализуются обычно на отдельной плате и соединяются с вычислительным модулем через разъем. Требования к УСО в составе ПК по типам и количеству входных и выходных сигналов определяются его конкретным применением. Для расширения областей применения ПК, как правило, обеспечивается его работа с наиболее распространенными типами датчиков и приборов измерения физических величин:

- температуры (термопары, термосопротивления);
- электрических величин (тока, напряжения, мощности);
- положения;
- механических деформаций;
- давления;
- расхода жидкостей;
- тепловой энергии и других.

Основными параметрами УСО в общем случае являются скорость и погрешность преобразования, а также диапазон входных/выходных напряжений и токов.

В настоящее время в зарубежной и отечественной промышленности используется в основном номенклатура датчиков с входными и выходными параметрами, нормированными в соответствии с международными стандартами.

Минимальная типовая номенклатура модулей УСО

Ввода-вывода дискретных сигналов:

- низкого (ТТЛ) уровня;
- среднего уровня напряжения и тока до 50 В и 100 ... 300 мА;
- высокого (до 260 В) уровня напряжения переменного или постоянного тока;
- ввода дискретных сигналов типа «сухой контакт».

Ввода аналоговых сигналов:

- среднего уровня по напряжению $\pm 5 \dots \pm 10$ В;
- по току 4 ... 20 мА;
- низкого уровня по напряжению 0 ... 500 мВ;
- по току 0 ... 4 мА.

Вывода аналоговых сигналов среднего уровня:

- величина сигналов по напряжению $\pm 5 \dots \pm 10$ В;
- по току 4 ... 20 мА.

Ввода время-импульсных сигналов:

- входные напряжения 5 ... 48 В;
- временной диапазон входных сигналов 1 ... 1000с.

Ввода число-импульсных сигналов:

- входные напряжения 5 ... 48 В;
- максимальная частота 10 ... 100 кГц;
- максимальное число суммирующих импульсов не менее 105 ... 106;
- минимальная длительность 5 ... 50 мкс.

Наиболее целесообразным вариантом структурной организации модуля УСО является разделение его на две функционально-конструктивные части. Одна часть – системная, реализующая функции сопряжения с УВК и в ряде случаев функции обработки информации, и вторая – собственно модуль УСО, осуществляющий непосредственный прием сигналов от датчиков технологического процесса и выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

На плате модуля УСО могут размещаться:

- преобразователь входного постоянного напряжения питания в постоянное напряжение питания разнотипных узлов (дискретных, аналоговых и других);
- интерфейсные преобразователи;
- функциональные узлы (например, АЦП) с гальванической развязкой;
- нормализаторы уровней сигналов, осуществляющие, например, преобразование тока в напряжение, фильтрацию и усиление аналогового

сигнала, смещение начального значения диапазона входных сигналов, согласование высокоуровневых входных и выходных дискретных сигналов от объекта с сигналами контроллера и обеспечивающие непосредственное подключение датчиков, двигателей и т. д.

На плате модуля УСО могут быть также установлены специализированные процессоры, выполняющие цифровую фильтрацию и предварительную обработку информации с датчиков, эталонный источник напряжения для оценки и коррекции метрологических характеристик АЦП и др. Такие интеллектуальные УСО позволяют существенно сократить затраты времени центрального процессора и повысить производительность системы. С развитием микроэлектроники цифровая обработка сигналов и другие интеллектуальные функции будут реализованы в УСО уже на уровне первичных преобразователей.

Модули УСО должны содержать элементы гальванического разделения цепей связи с датчиками и исполнительными устройствами.

Сигналы к УСО от датчиков (или сигналы от УСО к исполнительным устройствам) передаются по проводам, которые сопрягаются с кроссовыми соединителями (переходными устройствами) – кабельными разъемами или клеммными колодками с пружинящими или выполненными «под винт» зажимами (зажимы предпочтительнее, так как позволяют подсоединять и отсоединять провода независимо друг от друга).

Важным параметром системы управления, работающей в реальном времени, является *цикл системы* – время от начала измерения первого из всей совокупности контролируемых входных сигналов до выдачи последнего управляющего выходного сигнала. Цикл системы равен:

$$T = \frac{nt}{m},$$

где n – число каналов измерения (датчиков);

t – время одного измерения;

m – число обрабатывающих устройств.

Чем меньше цикл системы, тем выше качество управления. Минимальный цикл достигается при установке на каждый канал (датчик) обрабатывающего устройства. На практике задача минимизации цикла системы решается обычно с учетом ограниченной по стоимости. Типичные значения цикла системы находятся в пределах 20 ... 100 мс.

Для промышленных контроллеров, как и для УВК, характерна магистрально-модульная структура. Модуль процессора и модули УСО имеют единый функциональный, электрический и конструктивный интерфейс.

Средства индикации ПК предназначены для вывода информации о состоянии устройства и процесса управления в целом, о прохождении тестов и типов обнаруженных ошибок, а также о состоянии каналов связи с объектом управления. Элементами индикации могут служить светодиоды или светодиодные индикаторные панели. Введение средств индикации не является обязательным.

5.6. Правила позиционного обозначения приборов и средств автоматизации на функциональных схемах

Цель: ознакомиться с правилами позиционного обозначения приборов на функциональных схемах.

Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на функциональных схемах автоматизации, присваиваются позиционные обозначения (позиции).

Позиционные обозначения приборов и средств автоматизации образуются из двух частей: 1) арабских цифр – номера функциональной группы и 2) строчных букв русского алфавита – номера прибора и средств автоматизации в данной функциональной группе. При этом цифру **1** присваивают первому (слева) комплекту, цифру **2** – второму и т. д.

Буквенные обозначения присваиваются каждому элементу функциональной группы в порядке алфавита в зависимости от последовательности прохождения сигнала – от устройств получения информации к устройствам воздействия на управляемый процесс (например, приемное устройство – датчик, вторичный преобразователь, задатчик, регулятор, указатель положения, исполнительный механизм, регулирующий орган). У первичного преобразователя (чувствительного элемента) – индекс *a*, вторичного преобразователя – *б*, измерительного прибора – *в* и т. д. Таким образом, для одного комплекта полное обозначение первичного преобразователя будет **1a**, вторичного преобразователя – **1б** и т. д. В случае позиционного обозначения приборов вместо букв используют цифры: 1-1, 1-2, 1-3 и т. д.

Позиционные обозначения присваиваются всем элементам функциональных групп, за исключением:

- а) отборных устройств;
- б) приборов и средств автоматизации, поставляемых комплектно с технологическим оборудованием;

При определении границ каждой функциональной группы необходимо учитывать следующее обстоятельство: если какой-либо прибор или

регулятор связан с несколькими датчиками или получает дополнительные воздействия по другим параметрам (например, корректирующий сигнал), то все элементы схемы, осуществляющие дополнительные функции, относятся к той функциональной группе, на которую оказывается воздействие.

Регулятор соотношения, в частности, входит в состав той функциональной группы, на которую оказывается ведущее воздействие по независимому параметру. То же относится и к прямому цифровому управлению, где входным и выходным цепям контура регулирования присваивается одна и та же позиция.

В системах централизованного контроля с применением вычислительной техники, в схемах телеизмерения, а также в сложных схемах автоматического управления с общими для разных функциональных групп устройствами все общие элементы выносятся в самостоятельные функциональные группы.

Рассмотрим несколько примеров использования условных обозначений. На рис. 5.15, *а* изображен датчик (*E*) температуры (*T*). Это может быть, например, термопара, термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра и т. д. На рис. 5.15, *б* показан установленный на щите прибор для измерения температуры (*T*), показывающий (*I*) и регистрирующий (*R*), например автоматический потенциометр или мост. На рис. 5.15, *в* показан такой же прибор, с встроенным в него регулятором (*C*) и укомплектованный панелью дистанционного управления (*HC*).



Рис. 5.15. Примеры условных изображений на функциональных схемах средств измерения и регулирования температуры: а) датчик температуры; б) показывающий и регистрирующий прибор; в) показывающий и регистрирующий прибор с регулятором, укомплектованный панелью дистанционного управления

На рис. 5.16, *а* показан датчик (*E*) расхода (*F*), например диафрагма расходомера переменного перепада давлений или бак расходомера переменного уровня. На рис. 5.16, *б* – промежуточный преобразователь (*T*) расходомера (*F*). Это может быть дифманометр, преобразующий перепад давления на диафрагме (в первом случае) или давление столба жидкости в баке (во втором) в пневматический или электрический промежуточный сигнал. Однако это может быть и ротаметр с дистанционной передачей, у

которого промежуточный преобразователь смонтирован в одном корпусе с датчиком (поплавок). На рис. 5.16, в изображен прибор, показывающий (I) и регистрирующий (R) величину расхода (F), со встроенной станцией управления (K). Вместе с прибором на щите установлен регулятор расхода (FC).

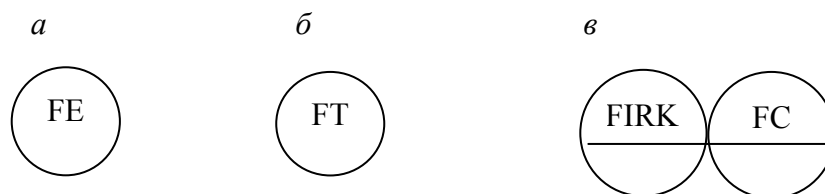


Рис. 5.16. Примеры условных изображений на функциональных схемах средств измерения и регулирования расхода: а) датчик расхода; б) датчик расхода, снабженный промежуточным преобразователем либо промежуточный преобразователь; в) показывающий и регистрирующий прибор со встроенной станцией управления и регулятор расхода

На рис. 5.17 приведен пример функциональной схемы автоматизации процесса нагрева кислоты горячей водой. Как видно из приведенной схемы, она содержит один контур регулирования – температуры кислоты ($5a - 5e$). Остальные устройства предназначены для измерения расхода горячей воды ($1a - 1в$), расхода кислоты ($4a - 4б$), температуры воды и кислоты на входе в теплообменник ($3a - 3в$). Кроме того, предусмотрена сигнализация при падении давления горячей воды (2).

Расположение элементов автоматизации на функциональной схеме определяется их назначением. Условные обозначения датчиков, промежуточных преобразователей, объединенных с датчиками в одно устройство, и исполнительных механизмов, то есть всех элементов АСР, механически связанных с технологическими аппаратами и трубопроводами, помещают рядом с изображением соответствующего оборудования ($1a, 3a, 3б, 4a, 5a, 5e$). Более того, условные обозначения датчиков и промежуточных преобразователей расходомеров, через которые проходят технологические потоки, размещают прямо на изображениях трубопроводов, в которых измеряются расходы ($1a$ и $4a$).

Всю остальную аппаратуру автоматизации: преобразователи, измерительные приборы, регуляторы и органы управления – выносят в нижнюю часть схемы. При этом вдоль листа вычерчивают прямоугольники, условно изображающие щиты и пульты. В этих прямоугольниках группируют аппаратуру по принципу общности расположения. Например, все преобразователи и приборы, расположенные рядом с местом измерения, то

есть смонтированные не на технологическом оборудовании, а на стенах цеха, колоннах, на полу располагают в одном прямоугольнике (1б, 2).

В другом прямоугольнике расположены условные обозначения аппаратуры автоматизации, размещенной на щите управления процессом (1в, 3в, 4б, 5б, 5г, 5д).

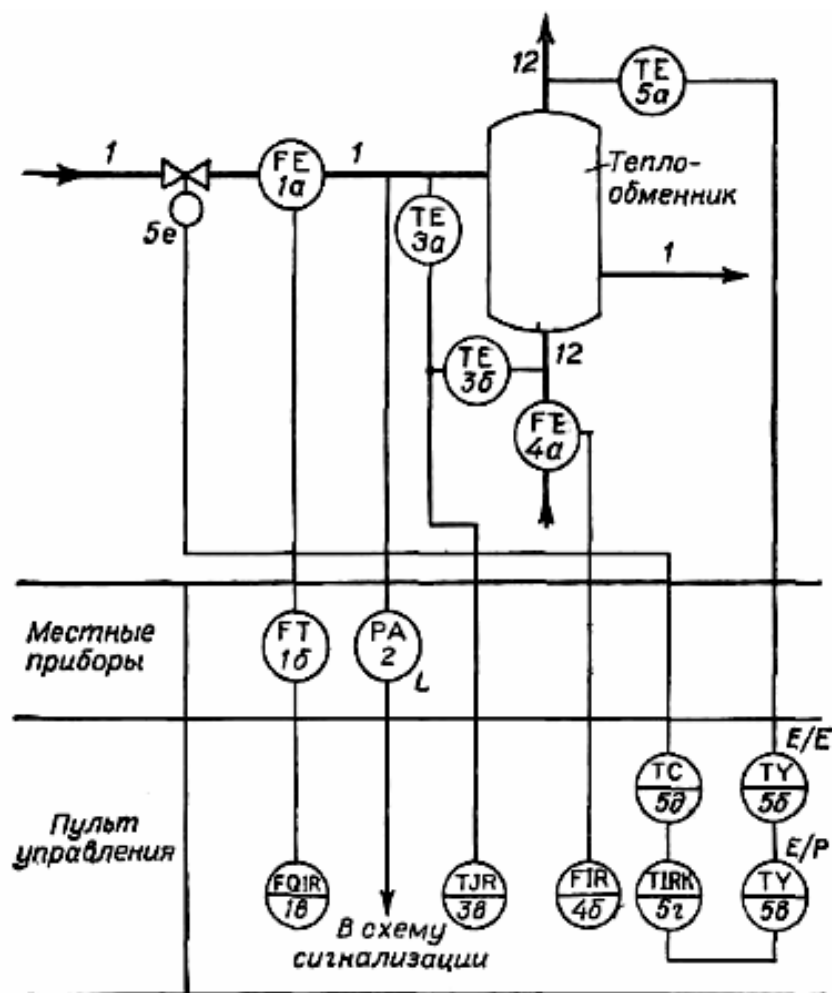


Рис. 5.17. Пример построения функциональной схемы

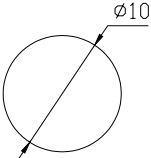
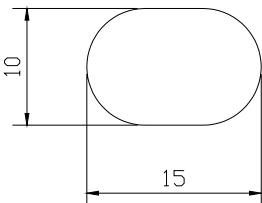
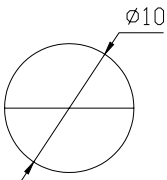
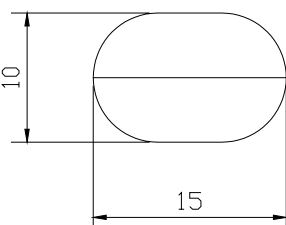
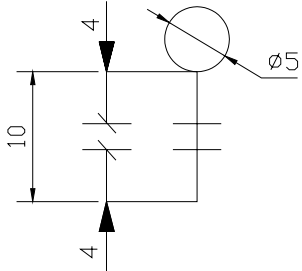
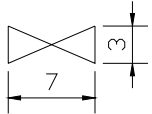
Поскольку функциональная схема автоматизации предназначена для отражения только структуры системы управления технологическим процессом, в ней не расшифровываются технические средства, использованные в конкретной схеме.

Расшифровка элементов автоматизации, изображенной на функциональной схеме, дается в спецификации. В спецификации по каждой позиции указывается тип устройства, его модификация, пределы измерения, требуемое количество и другие необходимые сведения [4], [6], [10].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Условные графические обозначения средств автоматизации

Наименование	Условное обозначение
Первичный измерительный преобразователь (датчик) или прибор, устанавливаемый по месту (на технологическом трубопроводе, аппарате, стене, полу, колонне, металлоконструкции)*	Базовое 
	Допускаемое 
Прибор, устанавливаемый на щите, пульте*	Базовое 
	Допускаемое 
Исполнительный механизм. Общее обозначение.	
Регулирующий орган	

* Графические изображения используют также для изображения пусковой аппаратуры, ключей управления и др.

Таблица П.2

**Условные графические обозначения электроаппаратуры,
используемой в функциональных схемах**

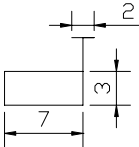
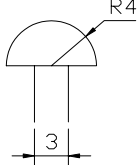
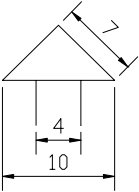
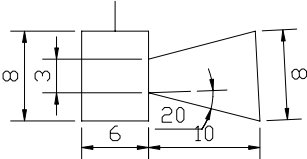
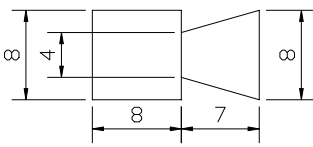
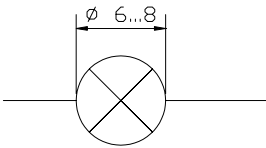
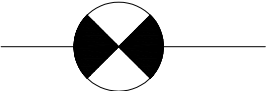
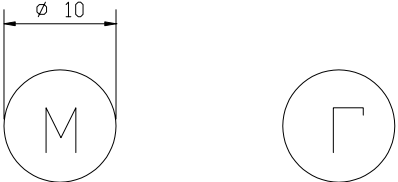
Наименование	Условное обозначение
Выключатель путевой	
Звонок электрический	
Сирена электрическая	
Гудок	
Ревун	
Лампа накаливания (осветительная и сигнальная)	
Для сигнальных ламп допускается следующее изображение	
Машина электрическая (М – двигатель, Г – генератор)	

Таблица П.3

Условное обозначение измеряемых параметров

Название	Обозначение
Давление, разрежение	<i>P</i>
Уровень	<i>L</i>
Расход	<i>F</i>
Температура	<i>T</i>
Плотность	<i>D</i>
Вязкость	<i>V</i>
Влажность	<i>M</i>
Состав, концентрация Для конкретизации измеряемой величины справа от условного графического изображения прибора необ- ходимо дать ее наименование или символ, например рН О ₂	<i>Q</i>
Несколько разнородных параметров Подробная расшифровка измеряемых величин должна быть дана около прибора или на свободном поле схемы	<i>U</i>
Электрическая величина	<i>E</i>
Время	<i>K</i>
Положение, перемещение	<i>G</i>
Скорость, частота	<i>S</i>
Масса	<i>W</i>
Радиоактивность В случае необходимости около условного графиче- ского изображения прибора допустимо указать вид радиоактивности	<i>R</i>

Таблица П.4

Условное обозначение уточнений параметров

Название	Обозначение
Разность, перепад	<i>D, d</i>
Соотношение, доля, дробь	<i>F, f</i>
Интегрирование	<i>Q, q</i>
Автоматическое переключение, обегание	<i>J</i>

Таблица П.5

Условное обозначение основных функций средств автоматизации

Название	Обозначение
Показание	<i>I</i>
Регистрация	<i>R</i>
Регулировка, управления	<i>C</i>
Дистанционное управление с помощью устройства, встроенного в измерительный прибор (например, станции управления)	<i>K</i>
Дистанционное управление с помощью отдельного (не встроенного в прибор или регулятор) устройства (например, кнопкой, ключом управления, задатчиком)	<i>H</i>
Преобразование измеряемого параметра (выходной сигнал датчика)	<i>E</i>
Дистанционная передача показаний	<i>T</i>
Преобразование сигнала (например, пневматического в электрический), выполнение вычислительных функций (например, извлечение корня)	<i>Y</i>
Сигнализация	<i>A</i>
Включение, отключение, переключение	<i>S</i>



ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Справочник / Под ред. Б.Д. Кошарского. – М.: Машиностроение, 1976.
2. Бушуев С.Д., Михайлов В.С. Автоматика и автоматизация производственных процессов. Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
3. Вычислительная техника в автоматизированных системах. Учеб. пособие / Под общ ред. Ю.М. Смирнова, В.И. Маслякова. – Л.: ЛГУ, 1987.
4. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности: Учеб. для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1985.
5. Гольцман В.А. Приборы контроля и средств автоматики тепловых процессов. Учеб. пособие для СПТУ. – М.: Высш. шк., 1980.
6. ГОСТ 21.404-85. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Издательство стандартов, 1985.
7. Дойников В.Б., Гребцов В.Н. В помощь персоналу, обслуживающему контрольно-измерительные приборы и системы автоматизации котельных установок, сосудов, работающих под давлением трубопроводов пара и горячей воды (В вопросах и ответах). – Мн.: БОИМ, 2000.
8. Емельянов А.И., Емельянов В.А., Калинина С.А. Практические расчеты в автоматике. – М.: Машиностроение, 1967.
9. Калмаков А.А., Кувшинов Ю.Я., Романова С.С., Щелкунов С.А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1986.
10. Кармазе А.Н., Фитерман М.Я. Контрольно-измерительные приборы и автоматика: Учеб. для средних ПТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1988.
11. Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. Коркин Б.Н., Макаров Э.Ф. Основы автоматизации измерений. Учеб. пособие. – М.: Издательство стандартов, 1991.
13. Королев Г.В. Электронные приборы автоматики. Учеб. пособие для средн. учеб. заведений. – М.: Машиностроение, 1991.
14. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989.

15. Кузин А.Ю., Мальцев П.П. и др. Датчики теплотехнических и механических величин: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
16. Кузнецов М.М. и др. Автоматизация производственных процессов: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1978.
17. Мухин В.С., Саков А.А. Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов: Учеб. пособие для СПТУ. – М.: Высш. шк., 1988.
18. Мухин О.А. Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции. Учеб. пособие. – Мн.: Вышэйшая школа, 1986.
19. Наладка приборов и устройств технологического контроля. Справочное пособие / Под общ. ред. А.С. Ключева. – М.: Энергия, 1976.
20. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1982.
21. Рульников А.А., Горюнов И.И., Евстафьев К.Ю. Автоматическое регулирование: Учеб. – М: ИНФРА-М, 2005.
22. Сазонов А.А. Микроэлектронные устройства автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
23. Устройства теплотехнических измерений и автоматического управления электростанций. Пособие для программированного обучения / Под общ. ред. Ю.А. Клушина, С.Ф. Чистякова. – М.: Энергия, 1975.
24. Хубаев С.К. Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции. – М.: АСВ, 2004.
25. Чистович С.А., Аверьянов В.К., Темпель Ю.Я. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления. – Л.: Стройиздат, 1987.
26. Юрманов Б.Н. Автоматизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – Л.: Стройиздат, 1976.

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В СИСТЕМАХ ТГВ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальности 1-70 04 02
«Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

Составитель
ЧЕПИКОВА Надежда Викторовна

Редактор О.П. Михайлова

Дизайн обложки И.С. Васильевой

Подписано в печать 04.11.05. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 11,6. Уч.-изд. л. 11,52. Тираж 100. Заказ 1129.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ 02330/0133020 от 30.04.04

ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04