

А.Ф. Фёдоров, Е.А. Кузьменко

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

dreamstime



А.Ф. Фёдоров, Е.А. Кузьменко

**Системы управления  
химико-технологическими  
процессами**

•

*Учебное пособие*

Томск  
2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	10
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И СРЕДСТВАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ .....	12
2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	15
2.1. Основные понятия .....	15
2.2. Манометрические термометры .....	15
2.3. Термометры сопротивления .....	17
2.4. Термоэлектрические термометры.....	22
2.5. Пирометры излучения.....	28
2.6. Преобразователи измерительные (нормирующие).....	32
3. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	35
3.1. Электрические системы передачи информации .....	35
3.2. Пневматические системы передачи информации .....	39
3.3. Пневмоэлектрические преобразователи.....	42
3.4. Электропневматические преобразователи.....	44
3.5. Построение измерительных комплектов температуры.....	45
4. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ.....	47
4.1. Жидкостные манометры.....	47
4.2. Деформационные манометры .....	49
4.3. Электрические манометры.....	53
4.4. Защита манометров от вредного воздействия измеряемой среды.....	54
5. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ВЕЩЕСТВА.....	54
5.1. Измерение количества вещества.....	55
5.2. Измерение расхода вещества.....	55
6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ .....	66
6.1. Поплавковые уровнемеры.....	66
6.2. Гидростатические уровнемеры.....	68
6.3. Пьезометрические уровнемеры .....	70
6.4. Электрические уровнемеры .....	71
6.5. Акустические уровнемеры .....	72
7. КОНТРОЛЬ СОСТАВА И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.....	74
7.1. Термохимические газоанализаторы .....	75
7.2. Термокондуктометрические газоанализаторы .....	76
7.3. Термомагнитные газоанализаторы .....	77
7.4. Пламенно-ионизационные газоанализаторы.....	78
7.5. Оптико-абсорбционные газоанализаторы.....	79
7.6. Сорбционные газоанализаторы.....	82
7.7. Методы анализа растворов.....	84
7.8. Измерение плотности жидкостей .....	89
7.9. Измерение вязкости жидкостей .....	94
7.10. Измерение влажности газов и сыпучих материалов .....	98
8. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	101
8.1. Основные понятия и определения .....	101
8.2. Математическое описание АСР и их элементов.....	105
8.3. Преобразования Лапласа .....	112
8.4. Передаточные и переходные функции .....	115
8.5. Соединение звеньев .....	118
8.6. Типовые звенья АСР .....	119
8.7. Технологические объекты регулирования .....	127

8.8. Экспериментальное определение динамических характеристик объектов	132
8.9. Автоматические регуляторы .....	133
8.10. Исполнительные механизмы и регулирующие органы .....	142
8.11. Анализ и синтез одноконтурных АСР .....	144
<b>9. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ</b>	<b>157</b>
9.1. Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики .....	158
9.2. Комплекс «Старт» .....	163
<b>10. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ</b> .....	<b>183</b>
10.1. Функции АСУ ТП .....	183
10.2. Разновидности АСУ ТП .....	184
10.3. Состав АСУ ТП .....	189
10.4. Современная реализация АСУ ТП .....	190
<b>11. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ</b> .....	<b>192</b>
11.1. Регулирование процессов перемещения жидкостей и газов .....	193
11.2. Регулирование тепловых процессов .....	195
11.3. Регулирование массообменных процессов .....	200
11.4. Регулирование химических процессов .....	208
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ В СХЕМАХ ПО ГОСТ 21.404–</b>	<b>85</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	<b>222</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Химико-технологические процессы в абсолютном большинстве предназначены для получения продукта из сырья, поступающего в аппарат или группу аппаратов. Кроме того, для осуществления процесса в заданном режиме в аппарат подается или отводится энергия (рис. В.1).

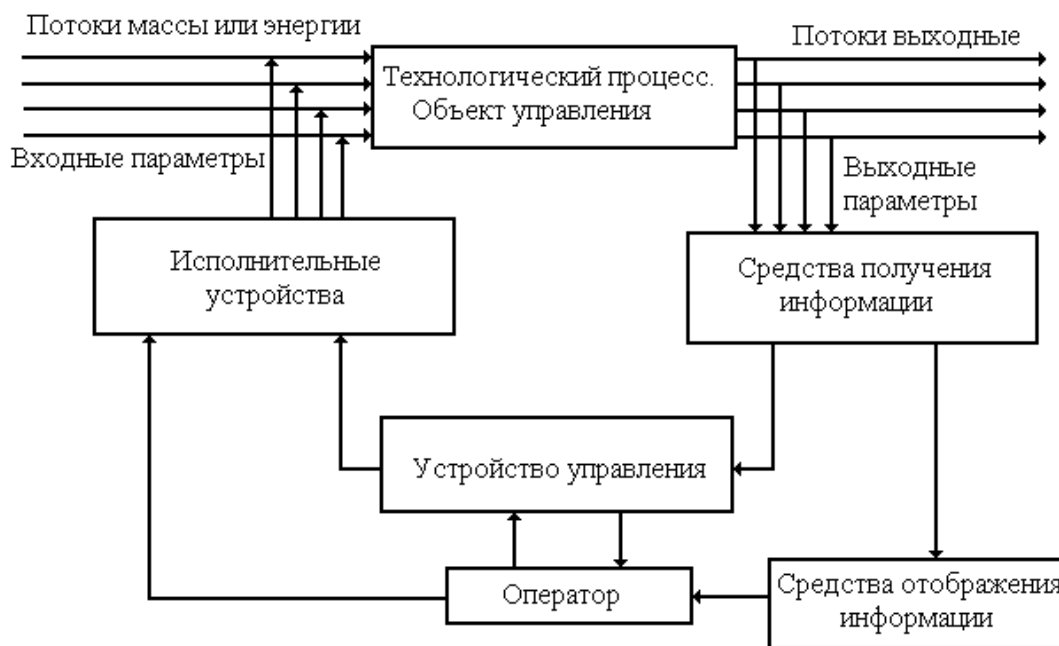


Рис. В.1. Схема системы управления технологическим процессом

**Управление – это целенаправленное воздействие на технологический процесс с целью обеспечения оптимальных условий его функционирования.** Аппарат или группа аппаратов, в которых протекает управляемый процесс, называется **объектом управления**. Изменяя подачу сырья или энергии в объект управления, можно обеспечить оптимальные условия его функционирования. Для оценки состояния объекта управления нужна информация о технологических параметрах. Средства получения информации в удобной для передачи форме передают ее на средства отображения информации и в устройство управления. Оператор с помощью отсчетных устройств оценивает состояние объекта управления. Устройство управления по определенному алгоритму обрабатывает полученную информацию и с помощью исполнительных устройств изменяет подачу массы или энергии в объект.

Автоматизация технологических процессов подразумевает замену человека самодействующими устройствами, которые выполняют функции управления.

Первые опыты такой замены относятся ко второй половине XVIII в.

Первый промышленный регулятор питания парового котла построил в 1765 г. И.И. Ползунов в г. Барнауле, а в 1784 г. английский механик Дж. Уатт взял патент на усовершенствование центробежного регулятора с использованием его для регулирования скорости паровой машины. Эти работы положили начало внедрению регуляторов в промышленные технологические процессы. Многие неудачи имели место потому, что конструирование регуляторов осуществлялось без учета свойств объектов и без теоретических исследований систем.

Основы теории регулирования были разработаны русским ученым И.А. Вышнеградским. Им были опубликованы статьи «Об общей теории регуляторов» (1876) и «О регуляторах прямого действия» (1877). И.А. Вышнеградский рассмотрел регулятор и объект как единую систему, динамические свойства которой описываются дифференциальными уравнениями. Предложив для исследования таких систем метод малых колебаний и линеаризовав нелинейные дифференциальные уравнения, он сформулировал возможности математического исследования систем различной физической природы, заложил основы теории устойчивости линейных систем и предложил алгебраические критерии и диаграммы для оценки устойчивости систем третьего порядка.

Большой вклад в развитие теории регулирования внесли Дж. Максвелл, А. Стодола, А. Гурвиц, Х. Найквист, Н.Е. Жуковский, который является автором первого русского учебника «Теория регулирования хода машин» (1909). Следует отметить большой вклад в развитие теории регулирования русских ученых В.С. Кулебакина, Ю.Г. Корнилова, Н.М. Крылова, Н.Н. Боголюбова, И.Н. Вознесенского, А.В. Михайлова, В.В. Солодовникова, А.М. Ляпунова, А.А. Андропова, Я.З. Цыпкина, А.А. Фельдбаума, Л.С. Понтрягина, Н.Н. Красовского и многих других.

Известно, что развитие химической промышленности в СССР началось во второй половине XX в. Для разработки и внедрения систем регулирования был создан Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации, построены заводы по производству средств контроля и регулирования технологических процессов.

Использование цифровых вычислительных машин открыло новую эру в управлении технологическими процессами и проектировании систем управления. Прикладные пакеты программ (Control-C, PC-Matlab, ORACL, MATRIX<sub>x</sub>, Program CC и др.) позволяют рядовому инженеру проектировать современные системы управления технологическими процессами.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И СРЕДСТВАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

**Измерение – это процесс сравнения с помощью технических средств измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения:**

$$Q = qU, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – результат;  $q$  – числовой эквивалент;  $U$  – единица измерения.

Измерения выполняются с помощью измерительных приборов и измерительных преобразователей.

**Измерительным прибором будем называть средство измерений, служащее для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.**

Для измерения технологических параметров используется большое количество измерительных приборов, построенных по единой схеме (рис. 1.1).

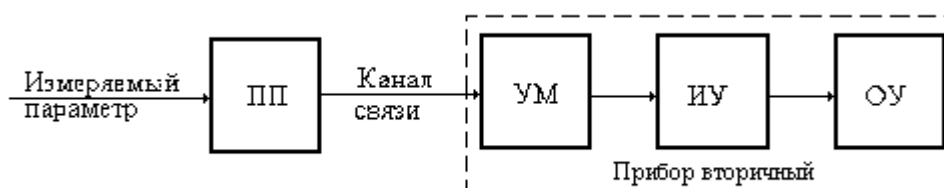


Рис. 1.1. Структурная схема измерительного прибора

Первичный преобразователь (ПП) находится в контакте с измеряемой средой и преобразует измеряемую величину в другую физическую величину, удобную для передачи по каналу связи. Каналом связи, в зависимости от физической природы сигнала, может служить контрольный кабель, трубка или кинематическая схема. Так как пришедший по каналу связи сигнал имеет малую мощность, то его усиливают в усилителе мощности (УМ) и передают на измерительное устройство (ИУ), где происходит сравнение измеряемой величины с единицей измерения. Результат измерения передается на отсчетное устройство (ОУ), позволяющее наблюдателю считывать результат измерения (показание прибора) и регистрировать на ленточной или дисковой диаграмме. Отсчетное устройство представляет собой шкалу со стрелкой или цифровое табло. Шкалы бывают равномерные и неравномерные, так как уравнения, связывающие показания прибора с измеряемой величиной, могут быть линейные и нелинейные. Шкала характеризуется нижним и верхним пределом измерения и ценой деления. Усилитель, измерительное устройство и отсчетное устройство располагаются в одном корпусе,

монтируемом на щите контроля. Таким образом, измерительный прибор состоит из трех элементов: первичного преобразователя, канала связи и прибора вторичного.

**Измерительный преобразователь – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи и дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не воспринимающейся непосредственно наблюдателем.**

Основными элементами измерительного преобразователя являются первичный преобразователь (ПП), промежуточный преобразователь (ПрП) и передающий преобразователь (ППр), рис. 1.2.

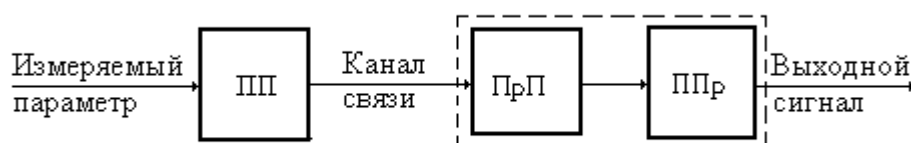


Рис. 1.2. Структурная схема измерительного преобразователя

Промежуточный преобразователь предназначен для выполнения необходимых преобразований сигнала, поступающего с первичного преобразователя (усиление, выпрямление и т. п.).

Передающий преобразователь предназначен для дистанционной передачи сигнала измерительной информации. В соответствии с требованиями Государственной системы приборов (ГСП) все средства измерений имеют унифицированные входные и выходные сигналы.

Таблица 1.1

Основные виды унифицированных аналоговых сигналов

Электрические сигналы			Пневматический сигнал, кПа
Постоянный ток, мА	Напряжение постоянного тока, мВ	Напряжение переменного тока, В	
0÷5 (-5)÷(+5) 0÷20 (-20)÷(+20) 4÷20	0÷10 (-10)÷0÷(+10) 0÷20 0÷50 0÷1000 (-1000)÷0÷(+1000) 0÷5000 0÷10000	0÷2 (-1)÷0÷(+1)	20÷100



**Точностные свойства средств измерений определяются приведенной погрешностью (классом точности):**

$$K = \frac{a_{\max}}{\Delta N} \cdot 100, \quad (1.2)$$

где  $a_{\max}$  – максимальная абсолютная погрешность, определяемая как разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины;  $\Delta N = N_{\max} - N_{\min}$  – диапазон шкалы прибора.

Значения приведенной погрешности присваиваются измерительным средствам из ряда следующих чисел:  $(1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) \cdot 10^n$ , где  $n = 1; 0; -1; -2$  и т. д.

Проверка соответствия измерительного устройства присвоенному классу точности осуществляется в процессе поверки, проводимой государственными и ведомственными метрологическими службами.

Значение класса точности указывается на шкале прибора.

**Статической характеристикой измерительного прибора или преобразователя называется зависимость выходного сигнала от входного в статическом режиме.** Статические характеристики могут быть представлены в виде уравнения  $y = f(x)$  или в виде графиков.

В зависимости от вида уравнения статические характеристики могут быть линейные и нелинейные. Приборы с линейными статическими характеристиками имеют линейную шкалу, удобную для снятия показания, поэтому более предпочтительны.

При измерении параметров в нестационарных (динамических) режимах на результат измерения оказывают влияние динамические свойства устройства измерения.

**Динамической характеристикой измерительного прибора или преобразователя называется зависимость выходного сигнала от входного во времени  $y = f(x, \tau)$ .** Динамические характеристики могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений, передаточных и переходных функций или в виде графиков. Если статическая характеристика прибора линейная, то динамическая характеристика описывается обыкновенным дифференциальным уравнением. Более подробно статические и динамические характеристики элементов и систем будут рассмотрены в разд. 8.2.

Измерения бывают прямые, когда результат измерения определяют непосредственно по шкале прибора, и косвенные, когда результат определяется по известной зависимости от результатов прямых измерений.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

### 2.1. Основные понятия

*Температура характеризует степень нагретости тела, определяемую внутренней кинетической энергией теплового движения молекул.*

Для измерения температуры используются *термодинамическая шкала температур*, предложенная в 1848 г. Кельвином на основе второго закона термодинамики, и *международная практическая температурная шкала*, названная шкалой Цельсия. Связь между температурой по термодинамической шкале и температурой по международной практической шкале определяется соотношением  $T = t + 273,15$ .

*Приборы для измерения температуры называют термометрами или пирометрами.*

Промышленные приборы для измерения температуры в зависимости от принципа действия классифицируются на следующие группы.

*Манометрические термометры*, действие которых основано на зависимости давления рабочего вещества в замкнутом объеме от температуры.

*Термоэлектрические термометры*, действие которых основано на зависимости термоэлектродвижущей силы, возникающей в спаяе двух разнородных материалов, от температуры.

*Термометры сопротивления*, действие которых основано на зависимости электрического сопротивления проводников от температуры.

*Пирометры излучения*, действие которых основано на зависимости интенсивности электромагнитного излучения нагретого тела от температуры.

### 2.2. Манометрические термометры

Манометрический термометр (см. рис. 2.1) состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометра 3. Внутренняя полость термометра заполняется рабочим веществом.

В зависимости от применяемого рабочего вещества манометрические термометры делятся:

- на *газозаполненные (газовые)*, в которых система заполнена газом;
- *жидкозаполненные (жидкостные)*, в которых система заполнена жидкостью;

- **конденсационные (парожидкостные)**, в которых термобаллон частично заполнен легкокипящей жидкостью, а остальное пространство системы заполнено парами этой жидкости.

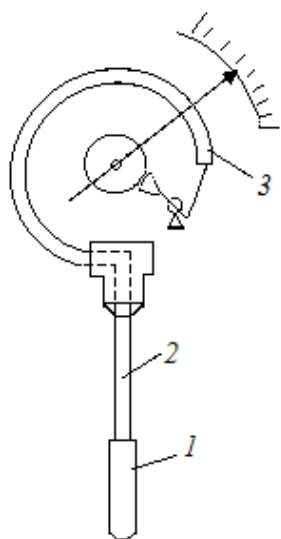


Рис. 2.1. Схема манометрического термометра

Если термобаллон 1 поместить в измеряемую среду, то при повышении температуры давление рабочего вещества в замкнутом объеме будет увеличиваться. Давление по капилляру 2 передается на трубчатый манометр 3, шкала которого отградуирована в градусах международной практической шкалы.

Манометрические газовые термометры обычно заполняются азотом и применяются для измерения температуры от 0 до +600 °С. При этом зависимость давления газа от температуры линейная:

$$p_t = p_0 [1 + \beta(t - t_0)], \quad (2.1)$$

где  $\beta = 1/273,15$  – температурный коэффициент расширения газа;  $t_0$  и  $t$  – начальная и конечная температура;  $p_0$  – давление рабочего вещества при температуре  $t_0$ .

Шкала прибора равномерная.

К недостаткам газовых термометров можно отнести большие размеры термобаллона, что затрудняет измерение температуры в небольших сосудах и трубопроводах малых диаметров. Из-за низкого коэффициента теплообмена между стенками термобаллона и рабочим газом наблюдается большая инерция измерения температуры. Возможны нарушение герметичности газовых термометров и утечка газа, поэтому необходима их частая проверка.

Манометрические жидкостные термометры обычно заполняются силиконовыми жидкостями, ртутью, толуолом, ксилолом, пропиловым спиртом с начальным давлением  $1,47 \div 1,96$  МПа и применяются для измерения температуры от –150 до +300 °С. При повышении температуры термобаллона жидкость расширяется и частично вытесняется в капилляр и манометрическую трубку, что приводит к деформации манометрической трубки и перемещению её свободного конца. Объем вытесненной из термобаллона жидкости

$$\Delta V = V(\beta_{\text{ж}} - 3\alpha)(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (2.2)$$

где  $V$  – объем термобаллона;  $\beta_{\text{ж}}$  – температурный коэффициент объемного расширения жидкости;  $\alpha$  – коэффициент объемного расшире-

ния материала термобаллона. Так как изменение объема жидкости при нагревании линейно зависит от температуры, то жидкостные термометры имеют равномерную шкалу.

Конденсационные манометрические термометры частично заполняются легкокипящей жидкостью (пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол и т. д.), а над поверхностью жидкости в термобаллоне находится насыщенный пар этой же жидкости. При изменении температуры изменяется давление насыщенного пара, измеряемое манометром, шкала которого отградуирована в градусах Международной практической шкалы. Шкала прибора неравномерная.

### 2.3. Термометры сопротивления

*Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве проводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры  $R_t = f(t)$ .*

Термометры сопротивления изготавливаются из платиновой или медной проволоки, намотанной на специальный каркас и помещенной в защитный чехол. Выбор металла для изготовления термометров сопротивления обусловлен рядом требований: стабильностью градуировочной характеристики; воспроизводимостью, обеспечивающей взаимозаменяемость термометров; линейной функцией  $R_t = f(t)$ ; высоким значением температурного коэффициента электрического сопротивления; большим удельным сопротивлением и невысокой стоимостью материала. Чехлы изготавливаются из нержавеющей стали, латуни, меди и алюминия.

Платиновые термометры сопротивления используются для измерения температуры в диапазоне от  $-200$  до  $+650$  °C.

Зависимость  $R_t = f(t)$  слабо нелинейная:

- в диапазоне температур от  $0$  до  $+650$  °C

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2); \quad (2.3)$$

- в диапазоне температур от  $-200$  до  $0$  °C

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2 + c(t - 100)t^3), \quad (2.4)$$

где  $R_0$  – сопротивление платины при температуре  $0$  °C;  $a, b, c$  – постоянные коэффициенты.

Промышленностью выпускаются термометры сопротивления платиновые (ТСП) с  $R_0 = 10$  Ом (градуировка 20),  $46$  Ом (градуировка 21) и  $100$  Ом (градуировка 22).

Медные термометры сопротивления используются для измерения температуры в диапазоне от  $-50$  до  $+200$  °С.

Зависимость  $R_t = f(t)$  линейная:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления меди.

Промышленностью выпускаются термометры сопротивления медные (ТСМ) с  $R_0 = 10$  Ом (градуировка 23) и  $R_0 = 53$  Ом (градуировка 24).

Никелевые термометры сопротивления используются для измерения температуры в интервале от  $-60$  до  $+180$  °С. Зависимость  $R_t = f(t)$  в интервале температур от  $-60$  до  $+100$  °С описывается уравнением (2.3), а в интервале температур от  $+100$  до  $+180$  °С описывается уравнением (2.4), где  $a, b, c$  – постоянные коэффициенты.

Для измерения температуры в комплекте с термометром сопротивления используются уравновешенные мосты и логометры.

**Уравновешенные мосты** делятся на неавтоматические (лабораторные) и автоматические (производственные). Уравновешенный мост (рис. 2.2) состоит из четырех плеч, куда включены два постоянных резистора  $R_1$  и  $R_3$ , переменный резистор  $R_2$  и сопротивление термометра  $R_t$ , и двух диагоналей, куда включены нулевой прибор (измерительная диагональ  $ab$ ) и источник питания ИП (диагональ питания  $cd$ ). Мост называется уравновешенным, если в момент измерения ток  $I_0$  в измерительной диагонали равен нулю. В соответствии с первым законом Кирхгофа токи в соответствующих плечах будут равны

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_t. \quad (2.6)$$

Тогда, согласно второму закону Кирхгофа, падение напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_3$  будет одинаково:

$$R_1 I_1 = R_3 I_3. \quad (2.7)$$

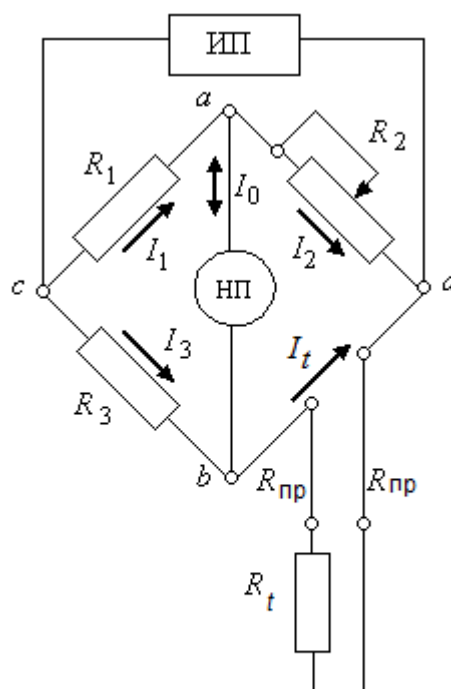


Рис.2.2. Схема уравновешенного моста

Падение напряжения на сопротивлениях плеч  $ad$  и  $bd$  также одинаково:

$$R_2 I_2 = (R_t + 2R_{\text{пр}}) I_t. \quad (2.8)$$

Разделив равенство (2.7) на равенство (2.8), с учетом равенства сопротивлений  $R_1$  и  $R_3$  и условия (2.6), получим

$$R_t = R_2 + 2R_{\text{пр}}. \quad (2.9)$$

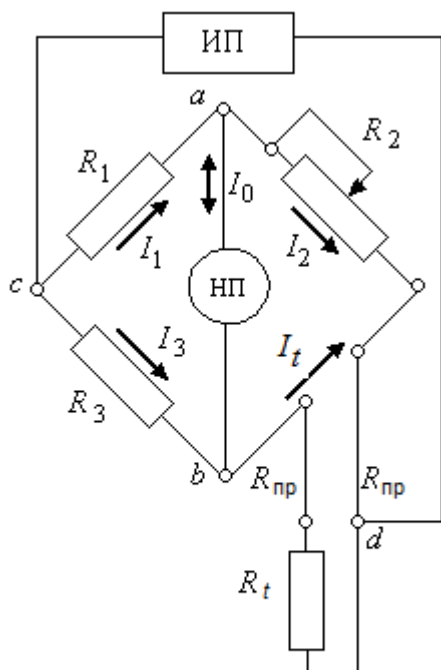


Рис. 2.3. Трехпроводная схема подключения ТС

Для измерения сопротивления  $R_t$  необходимо с помощью переменного резистора  $R_2$  уравновесить мост, установив стрелку нулевого прибора на нулевую отметку. Тогда искомое сопротивление  $R_t$  определится по величине сопротивления  $R_2$  с учетом сопротивления соединительных проводов  $R_{\text{пр}}$ , величина которых может изменяться с изменением температуры окружающей среды и вносить дополнительную погрешность в результат измерения. В таких случаях одну из вершин  $d$  моста переносят на клемму термометра (рис. 2.3).

Одно сопротивление  $R_{\text{пр}}$  оказывается соединенным последовательно с сопротивлением  $R_t$ , а сопротивление  $R_{\text{пр}}$

другого провода – с резистором  $R_2$ . Тогда уравнение равновесия моста запишется в виде

$$R_t + R_{\text{пр}} = (R_2 + R_{\text{пр}}) \frac{R_3}{R_1}. \quad (2.10)$$

Если сделать мост симметричным при  $R_1 = R_3$ , то получим

$$R_t + R_{\text{пр}} = R_2 + R_{\text{пр}}. \quad (2.11)$$

Тогда изменение сопротивления соединительных проводов не будет влиять на результат измерения.

В автоматических уравновешенных мостах перемещение движка реохорда осуществляется автоматически с помощью реверсивного двигателя. Подвижный контакт регулируемого сопротивления – реохорда располагают в измерительной диагонали так, что регулируемое сопро-

тивление оказывается размещенным в двух плечах. При этом переходное сопротивление контакта из-за отсутствия тока в момент равновесия не сказывается на результатах измерения (рис. 2.4). Регулируемое сопротивление содержит три параллельно соединенных резистора:  $R_p$  – собственно реохорд, движок которого перемещается с помощью реверсивного двигателя для установления состояния равновесия;  $R_{ш}$  – шунт реохорда;  $R_{п}$  – резистор для подгонки заданного значения параллельного соединения сопротивлений реохордной группы;  $R_1, R_2, R_3$  – резисторы мостовой схемы;  $R_d$  – добавочный резистор для подгонки тока;  $R_6$  – резистор балластный в цепи питания для ограничения тока;  $R_t$  – сопротивление термометра сопротивления;  $R_{л}$  – резисторы для подгонки сопротивлений соединительной линии.

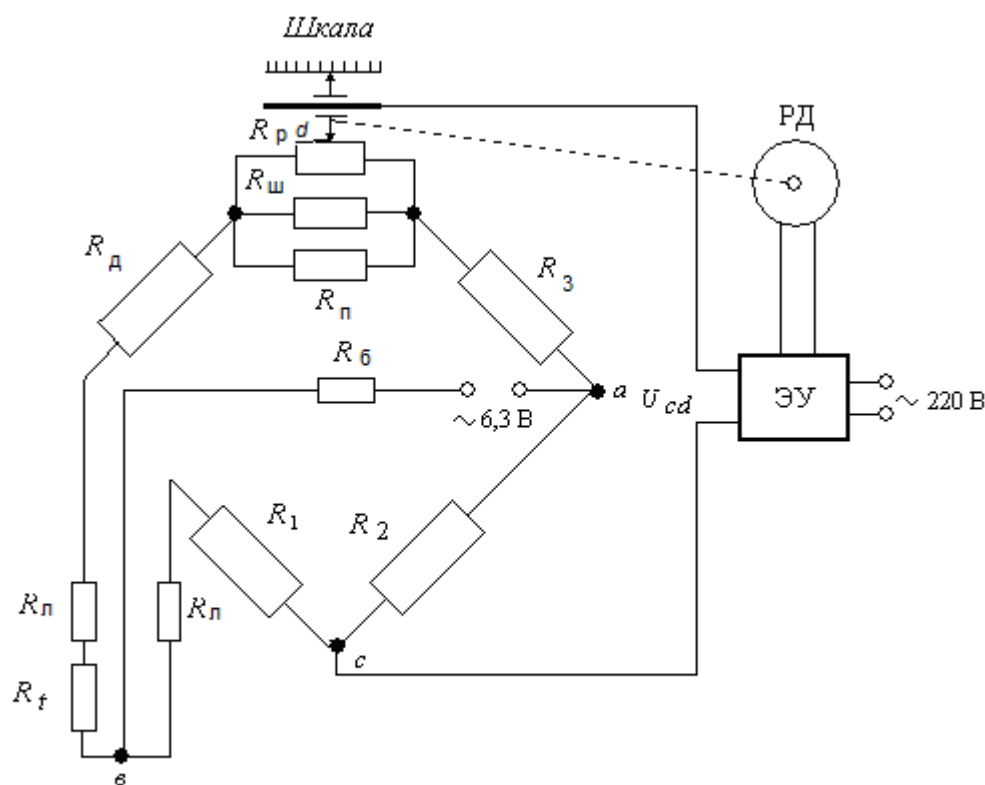


Рис. 2.4. Схема автоматического уравновешенного моста

При изменении температуры в объекте изменяется сопротивление термометра  $R_t$  и мост выходит из равновесия. В измерительной диагонали моста появляется напряжение  $U_{cd}$ , которое подается на вход электронного усилителя, являющегося нуль-индикатором. В зависимости от знака небаланса выходной вал реверсивного двигателя переместит движок реохорда до состояния равновесия моста, когда  $U_{cd} = 0$ . Вместе с движком реохорда перемещается стрелка отсчетного устройства, ука-

зывающая значение измеряемой температуры. Шкалы автоматических мостов градуируют в градусах Международной практической шкалы с учетом градуировки термометра сопротивления. Последняя обязательно указывается на шкале прибора.

Выпускаются автоматические мосты одноточечные и многоточечные с записью на дисковой или ленточной диаграмме; классы точности автоматических мостов равны 0,25; 0,5 и 1,0. В автоматические мосты могут быть встроены электрические и пневматические регулирующие устройства и преобразователи.

При измерении температуры электрическими термометрами сопротивления основными источниками погрешностей измерения являются:

1. Отклонение градуировочной характеристики термометра сопротивления от стандартной градуировочной таблицы, что неизбежно при изготовлении термометра сопротивления.

2. Изменение сопротивления подводящих проводов с изменением температуры окружающей среды, даже при трехпроводной схеме подключения термометра.

3. Основная погрешность и вариация прибора.

4. Отклонение температуры прибора от нормальной.

Измерительный комплект состоит из первичного преобразователя ПП – электрического термометра сопротивления и прибора вторичного ПВ – уравновешенного автоматического моста (рис. 2.5).

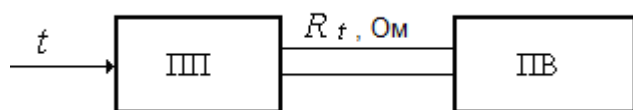


Рис. 2.5. Измерительный комплект для измерения температуры

**Неуравновешенные мосты** измеряют сопротивление электрического термометра по силе тока, протекающего в измерительной диагонали в момент измерения (см. рис. 2.6):

$$I_M = E(R_2 R_3 - R_1 R_t) / M, \quad (2.12)$$

где  $M = f(R_1, R_2, R_3, R_t, R_M)$ .

Из уравнения (2.12) следует, что сила тока в измерительной диагонали неуравновешенного моста зависит от величины сопротивления соединительных проводов  $R_M$  и на-

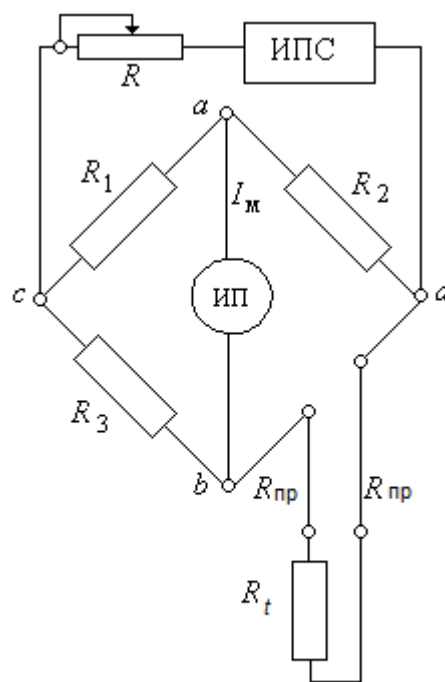


Рис. 2.6. Схема неуравновешенного моста



пряжения  $U_{ab}$  в измерительной диагонали моста, поэтому применяются стабилизированные источники питания (ИПС). Неуравновешенные мосты практически не используются для промышленных измерений температуры, а их применяют в измерительных схемах других приборов.

## 2.4. Термоэлектрические термометры

Действие приборов основано на использовании термоэлектрического эффекта, открытого Зеебеком в 1821 г. В замкнутой цепи, состоящей из двух или более разнородных материалов, возникает электрический ток, если спаи имеют разные температуры (рис. 2.7). Проводники  $A$  и  $B$  называют термоэлектродами. Рабочий спай имеет температуру  $t$  и помещается в измеряемую среду. Свободный спай имеет постоянную температуру  $t_0$ .

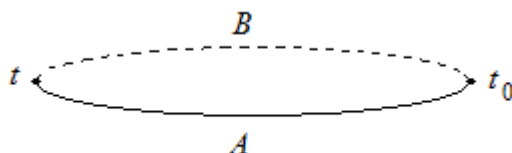


Рис. 2.7. Схема термоэлектрического термометра

Различные металлы обладают разной работой выхода электронов, поэтому в их спае возникает контактная разность потенциалов. Наблюдается также диффузия свободных электронов из более нагретых частей проводника в менее нагретые с большей интенсивностью, чем в обратном направлении. Поэтому при размыкании цепи термоэлектрического преобразователя (ТЭП) может быть измерена термоЭДС, величина которой зависит от природы проводников и разности температур спаев:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (2.13)$$

Зависимость (2.13) для различных термоэлектрических преобразователей имеет нелинейный характер и устанавливается экспериментально путем градуировки и последующего табулирования зависимости термоЭДС от температуры рабочего спая  $t$  при постоянной температуре свободного спая  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Для измерения термоЭДС термоэлектрического преобразователя в разрыв свободного спая включается измерительный прибор (рис. 2.8).

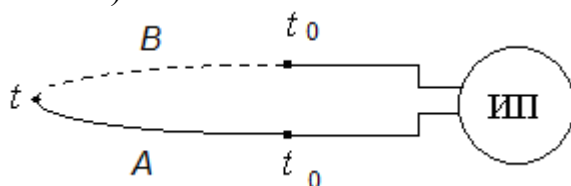


Рис. 2.8. Схема включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя

Подключение измерительного прибора к термоэлектрическому преобразователю осуществляется с помощью специальных термоэлектродных проводов.

Для изготовления термоэлектрических преобразователей используется проволока диаметром от 0,5 до 3 мм. Чтобы предохранить от механических повреждений и вредного влияния объекта измерения, преобразователи помещают в защитную арматуру. Защитные гильзы изготавливаются из различных сталей, окиси алюминия, карбида кремния. Изолированный по всей длине с помощью керамической трубки термоэлектрический преобразователь помещается в защитную арматуру, в комплект которой, кроме защитной гильзы, входит водозащищенная головка с колодкой зажимов. Рабочий спай может быть изолирован или соединен с защитной арматурой.

К материалам термоэлектродов предъявляют определенные требования, которым не удовлетворяют полностью ни один из известных термоэлектродных материалов. Поэтому для различных пределов измерения используются термоэлектрические преобразователи из различных материалов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Основные типы термоэлектрических преобразователей

Термоэлектрический преобразователь	Тип	Пределы измерения, °С	
		от	до
Платинородий – платина	ТПП	0	+1300
Платинородий – платинородий	ТПР	+300	+1600
Хромель – алюмель	ТХА	–200	+1000
Хромель – копель	ТХК	–200	+600
Медь – копель	ТМК	–200	+100
Вольфрамрений – вольфрамрений	ТВР	0	+2200

Кроме приведенных в табл. 2.1, выпускаются промышленные термоэлектрические преобразователи железо-константан ТЖК, медь-константан ТМК, хромель-константан ТХКн, нихросил-нисил ТНН.

Для измерения разности температур в двух точках используют дифференциальные термоэлектрические преобразователи (рис. 2.9).

Последовательно соединяя несколько термоэлектрических преобразователей, можно получить термобатарею, генерирующую большую термоЭДС (рис. 2.10).

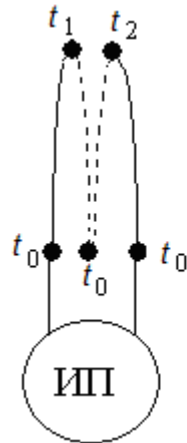


Рис. 2.9. Схема дифференциального ТЭП

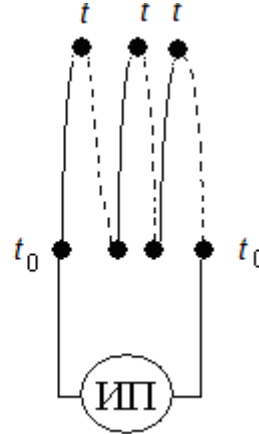


Рис. 2.10. Схема термобатареи

Для измерения температуры в комплекте с термоэлектрическими термометрами используются милливольтметры и потенциометры.

**Милливольтметр** — это измерительный прибор магнитоэлектрической системы. Принцип действия его основан на взаимодействии проводника, по которому протекает постоянный ток, с магнитным полем постоянного магнита. Термоэлектрический преобразователь с помощью соединительных проводов подключается к милливольтметру (рис. 2.11). При этом внешнее сопротивление  $R_{\text{вн}}$  необходимо сделать равным значению, указанному на шкале прибора (0,6; 1,6; 5,0; 15; 25 Ом). Для этой цели имеется специальная манганиновая катушка  $R_y$ , включенная последовательно с ТЭП.

Шкалы милливольтметров градуируются в градусах или милливольтмах. Если шкала отградуирована в градусах Международной практической шкалы, то милливольтметр называется пирометрическим (ПМВ). Градусная шкала используется только тогда, когда градуировка ТЭП соответствует градуировке шкалы милливольтметра. Промышленные приборы выпускаются с классами точности — 0,2; 0,5; 1,0.

Принцип действия **потенциометров** основан на компенсации измеряемой термоЭДС известной разностью потенциалов, создаваемой внешним источником. Схема потенциометра состоит из двух контуров (см. рис. 2.12).

Компенсационный контур  $I$

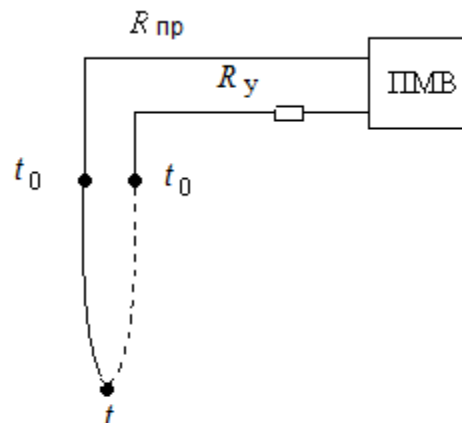


Рис. 2.11. Схема измерения термоЭДС пирометрическим милливольтметром

содержит источник напряжения  $E_6$  и переменный резистор (реохорд)  $R_{AB}$ . Измерительный контур  $II$  имеет в своем составе ТЭП и высокочувствительный гальванометр НП с нулем посередине шкалы, выполняющий роль нуль-индикатора, и часть  $R_{AC}$  реохорда. Источник напряжения  $E_6$  и ТЭП включены так, что на участке  $AC$  реохорда токи  $I_1$  и  $I_2$  текут в одном направлении. Тогда  $I_{AC} = I_1 + I_2$ . Для измерительного контура на основании второго закона Кирхгофа справедливо равенство

$$E(t, t_0) = I_2 (R_{НП} + R_{ВН}) + I_{AC} R_{AC},$$

где  $R_{НП}$  – сопротивление нуль-индикатора;  $R_{ВН}$  – сопротивление соединительных проводов, включая ТЭП. Теперь найдем выражение для тока  $I_2 = [(E(t, t_0) - I_1 R_{AC})] / (R_{НП} + R_{ВН})$ . В момент компенсации измеряемой термоЭДС, достигаемой перемещением движка реохорда  $C$ , ток  $I_2$  становится равным нулю. Тогда  $E(t, t_0) = I_1 R_{AC}$ . При этом стрелка нуль-индикатора будет стоять на нулевой отметке шкалы.

Величину измеряемой термоЭДС можно найти по величине сопротивления  $R_{AC}$ , если известен рабочий ток  $I_1$  в компенсационном контуре. Для установки и контроля величины рабочего тока  $I_1$  предусмотрен дополнительный контур  $III$ , включающий в себя нормальный ртутно-кадмиевый элемент Вестона, развивающий при температуре  $20^\circ\text{C}$  ЭДС, равную  $1,01830\text{ В}$ , и сохраняющий при кратковременных и малых нагрузках это значение в течение длительного времени (см. рис. 2.13), постоянный резистор  $R_K$  и ключ Кл.

Установив ключ Кл в положение  $K$ , регулируют силу тока  $I_1$  в компенсационном контуре с помощью переменного резистора  $R_B$  так, чтобы стрелка нуль-индикатора установилась на нулевой отметке шкалы. При этом разность потенциалов на резисторе  $R_K$  становится равной ЭДС нормального элемента  $E_{НЭ} = I_1 R_K$ , а сила тока в компенсационном контуре  $I_1 = E_{НЭ} / R_K = \text{const}$ .

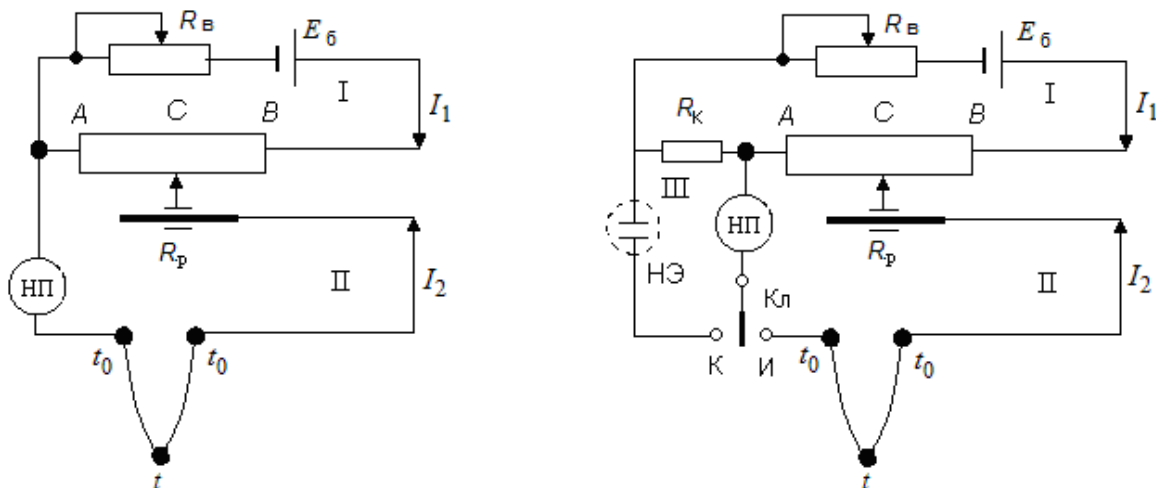


Рис. 2.12. Принципиальная схема  
потенциометра

Рис. 2.13. Схема потенциометра  
с постоянной силой рабочего тока

Для измерения термоЭДС ТЭП ключ Кл устанавливают в положение *II*. Стрелку нуль-индикатора выводят на нулевую отметку шкалы, перемещая движок реохорда *C*. При этом сила тока  $I_2$  в измерительном контуре становится равной нулю и  $E(t, t_0) = I_1 R_{AC} = k R_{AC}$ . Значение термоЭДС определяется по шкале реохорда в милливольтках. Так как измерение термоЭДС производится при  $I_2 = 0$ , то сопротивление соединительных проводов и ТЭП не влияет на результат измерения.

В **автоматических потенциометрах** перемещение движка реохорда производится с помощью реверсивного двигателя (рис. 2.14).

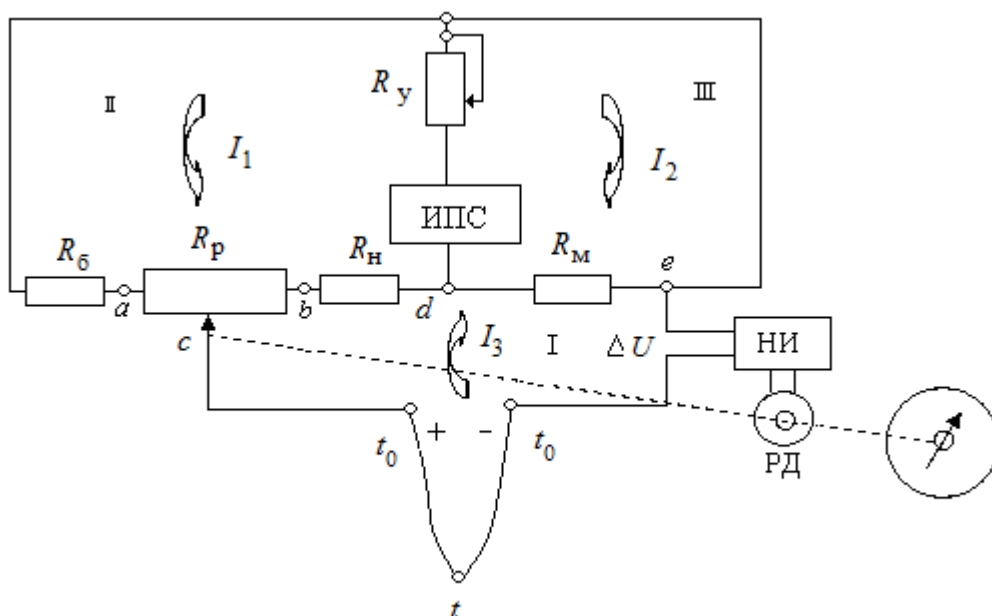


Рис. 2.14. Измерительная схема автоматического потенциометра

Измерительная схема автоматического потенциометра содержит три замкнутых контура. Контур *II* и *III* запитаны от источника стабилизированного питания ИПС, имеющего выходное напряжение постоянного тока 5 В. С помощью резистора  $R_Y$  устанавливается рабочий ток  $I_2 = 2$  мА. Установка рабочего тока  $I_2$  осуществляется только при проверке и градуировке потенциометра.

Резисторы  $R_6$  и  $R_H$  предназначены для установки значения тока  $I_1 = 3$  мА и начала шкалы. Реохорд  $R_P$  изготавливается из калиброванной проволоки специального сплава. Для автоматического введения поправки на температуру свободных концов ТЭП в контур *III* включен резистор  $R_M$  из медной проволоки.

В состоянии равновесия, когда термоЭДС ТЭП скомпенсирована падением напряжения  $U_{ce}$ , ток в измерительном контуре  $I$  равен нулю и напряжение небаланса  $\Delta U = E(t, t_0) - U_{ce} = 0$ . При изменении температуры в объекте изменится термоЭДС ТЭП и на входе в нуль-индикатор появится напряжение небаланса  $\Delta U$ , под влиянием которого формируется управляющий сигнал, подаваемый на реверсивный двигатель  $РД$ . Выходной вал последнего перемещает движок реохорда  $C$  до тех пор, пока  $\Delta U$  не станет равным нулю. В состоянии равновесия каждому положению реохорда соответствует определенное значение термоЭДС, поэтому вместе с движком реохорда перемещается стрелка прибора.

Увеличение температуры свободных концов  $t_0$  на величину  $\Delta t_0$  приведет к уменьшению термоЭДС на величину  $\Delta E$  и увеличению значения сопротивления резистора  $R_M$  на величину  $\Delta R_M$ , что, в свою очередь, приведет к увеличению падения напряжения  $\Delta U_{de} = I_2 \Delta R_M$ :

$$E(t, t_0) - \Delta E = U_{cb} + U_{bd} - (U_{de} + \Delta U_{de}) = U_{ce} - \Delta U_{de}. \quad (2.14)$$

При неизменной температуре рабочего спая  $t$  и любой температуре свободных концов  $t_0$  движок реохорда не будет перемещаться, если выполняется условие

$$\Delta E = \Delta U_{de} = I_2 \Delta R_M. \quad (2.15)$$

Значение сопротивления резистора  $R_M$  при температуре  $t_0 = 0$  определяется, с учетом линейной зависимости сопротивления  $R_M$  от температуры, из выражения

$$R_{M0} = \Delta E / \alpha \Delta t I_2, \quad (2.16)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления меди;  $I_2 = 2$  мА;  $\Delta t = 50$  °С.

Промышленностью выпускаются показывающие и регистрирующие потенциометры, одноточечные и многоточечные с записью на ленточной и дисковой диаграмме; классы точности автоматических потенциометров равны 0,25; 0,5 и 1,0.

Шкалы автоматических потенциометров градуируются в милливольтах или в градусах Цельсия Международной практической шкалы. В последнем случае на шкале указывается градуировка ТЭП, предназначенного для работы в комплекте с этим прибором.

Измерительный комплект состоит из первичного преобразователя – термоэлектрического преобразователя ТЭП и прибора вторичного ПВ – автоматического потенциометра (рис. 2.15).

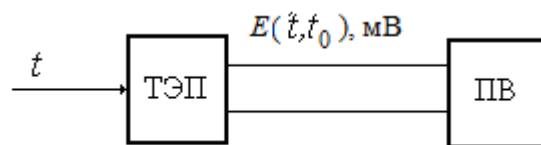


Рис. 2.15. Измерительный комплект с ТЭП

При измерении температуры с помощью ТЭП и электронного автоматического потенциометра основными источниками погрешностей являются:

1. Отклонение градуировочной характеристики ТЭП от стандартной градуировочной таблицы.
2. Отклонение температуры прибора от градуировочной.
3. Основная погрешность и вариация прибора.

Источники погрешностей неизбежны при изготовлении и эксплуатации ТЭП.

Для исключения погрешности п. 2 необходимо исключить значительные колебания температуры окружающей среды, которая не должна выходить за пределы  $0 \div 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Погрешность п. 3 неизбежна при изготовлении и эксплуатации прибора, поэтому автоматические потенциометры должны проходить поверку в установленные сроки.

## 2.5. Пирометры излучения

**Действие приборов основано на зависимости интенсивности электромагнитного излучения нагретого тела от температуры.**

Твердые тела излучают волны всех длин – от инфракрасного до ультрафиолетового участка спектра. С повышением температуры цвет нагретого тела изменяется от темно-красного до белого. При этом с изменением цвета возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ), то есть излучение определенной длины волны, а также увеличивается интегральное излучение.

Возрастание величины СЭЯ до температуры  $3000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  описывается уравнением Вина

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T), \quad (2.17)$$

где  $E_{0\lambda}$  – СЭЯ абсолютно черного тела для излучения длиной волны  $\lambda$ ;  $T$  – абсолютная температура тела, К;  $C_1$  и  $C_2$  – константы излучения.

При более высоких температурах возрастание СЭЯ с увеличением температуры описывается уравнением Планка

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T - 1)^{-1}]. \quad (2.18)$$

Таким образом, измеряя величину СЭЯ, можно определить температуру нагретого тела.

В *квазимонохроматических (фотоэлектрических) пирометрах* сравнивается яркость монохроматического излучения нагретого тела с СЭЯ эталонного тела – нити лампы накаливания, имеющей известную температуру (рис. 2.16).

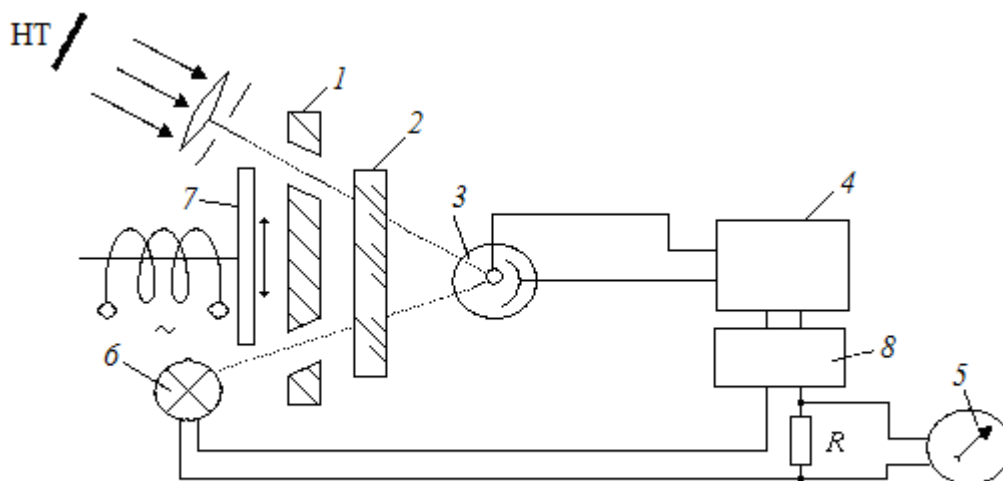


Рис. 2.16. Принципиальная схема фотоэлектрического пирометра

Система находится в состоянии равновесия, если температура нагретого тела и температура нити лампы накаливания 6 равны. Поток излучения, ограниченный диафрагмой 1, проходит через красный светофильтр 2 и прерывается поочередно заслонкой 7. При изменении температуры нагретого тела изменится СЭЯ, тогда в цепи фотоэлемента 3 появится переменная составляющая фототока, усиленная электронным усилителем 4 и поступающая на фазочувствительный каскад силового блока 8.

В результате изменяется ток, протекающий через нить лампы накаливания, до тех пор, пока поток электромагнитной энергии от лампы накаливания не станет равным потоку электромагнитной энергии от нагретого тела. По величине тока, протекающего по нити лампы накаливания, можно оценить температуру нагретого тела. Падение напряжения на сопротивлении  $R$  измеряется с помощью автоматического потенциометра, шкала которого отградуирована в значениях яркостной температуры.

Основная погрешность фотоэлектрических термометров составляет  $\pm 1 \%$  при верхнем пределе измерений до  $2000^\circ\text{C}$  и  $\pm 1,5 \%$  при верхнем пределе более  $2000^\circ\text{C}$ .



Зависимость СЭЯ абсолютно черного тела от длины волны имеет экстремальный характер (рис. 2.17). Длина волны  $\lambda_{\max}$  уменьшается с повышением абсолютной температуры тела. Соотношение между  $\lambda_{\max}$  и  $T$  устанавливается законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} T = b,$$

где  $b = 2897$  мкм · К.

Изменение цвета нагретых тел при повышении температуры объясняется законом Вина и связано с перераспределением энергии излучения, поэтому методы измерения, основанные на изменении распределения энергии внутри заданного участка спектра, называются **цветовыми**.

**Пирометры спектрального отношения**, или **цветовые пирометры** определяют температуру по соотношению спектральных энергетических яркостей, соответствующих длинам волн  $\lambda_1 = 0,66$  мкм и  $\lambda_2 = 0,47$  мкм. В соответствии с законами Вина и Планка такое отношение СЭЯ однозначно зависит от температуры нагретого тела. Измеряемое излучение (см. рис. 2.18) через объектив 1 и фильтры обтюратора 2 попадают на фотоэлектрический приемник 3. Обтюратор – это диск с двумя отверстиями, закрытыми красным и синим светофильтрами.

При вращении обтюратора на фотоэлектрический приемник попеременно попадает излучение соответствующей длины волны, поэтому в цепи фотоэлемента формируются импульсы фототока, пропорциональные соответствующей СЭЯ.

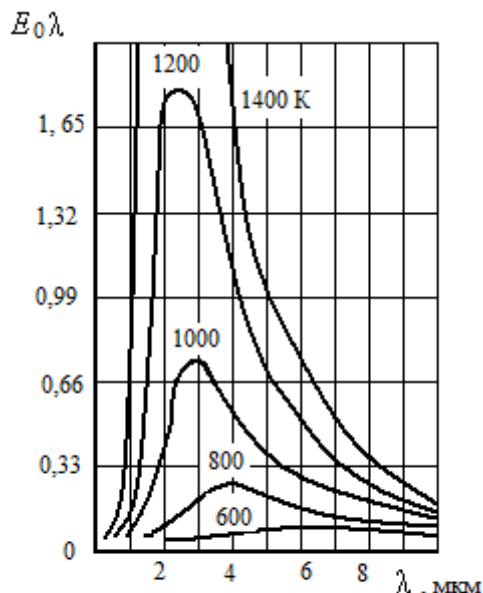


Рис. 2.17. Зависимость СЭЯ абсолютно черного тела от длины волны

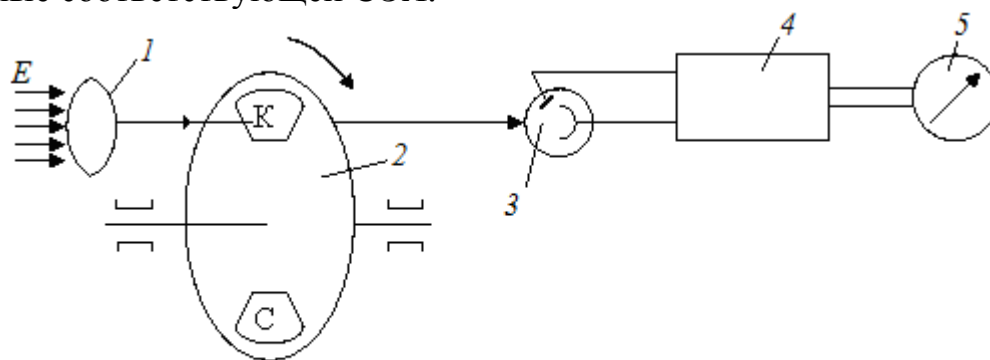


Рис. 2.18. Принципиальная схема пирометра спектрального отношения

В результате преобразования этих сигналов электронным устройством 4 на милливольтметр 5 поступает электрический сигнал постоянного тока, сила которого зависит от соотношения спектральных энергетических яркостей излучений двух длин волн, а следовательно, и от температуры нагретого тела.

Пирометры отношения измеряют температуру от 1400 до 2800 °С; основная погрешность измерения не превышает  $\pm 1\%$ .

Действие *радиационных пирометров*, или *пирометров полного излучения*, основано на законе Стефана – Больцмана:

$$E_0 = C_0 (T_y / 100)^4, \quad (2.19)$$

где  $C_0$  – константа излучения абсолютно черного тела.

Интегральное излучение  $E_0$  абсолютно черного тела пропорционально четвертой степени его температуры  $T_y$ .

Интегральное излучение реального тела

$$E = \varepsilon C_0 (T / 100)^4, \quad (2.20)$$

где  $\varepsilon = E / E_0$  – степень черноты реального тела.

Учитывая, что  $E = \varepsilon E_0$ , получим  $T = T_y \sqrt[4]{1/\varepsilon}$ , где  $T_y$  – условная температура, измеренная пирометром полного излучения. При малых значениях  $\varepsilon$  отличие измеренной температуры  $T_y$  от действительной может достигать значительной величины, поэтому следует вводить поправку на степень черноты реального тела.

Для измерения энергии, испускаемой нагретым телом, радиационные пирометры имеют теплоприемник 4 (рис. 2.19), представляющий термобатарею, прикрепленную к платиновой фольге, покрытой платиновой чернью.

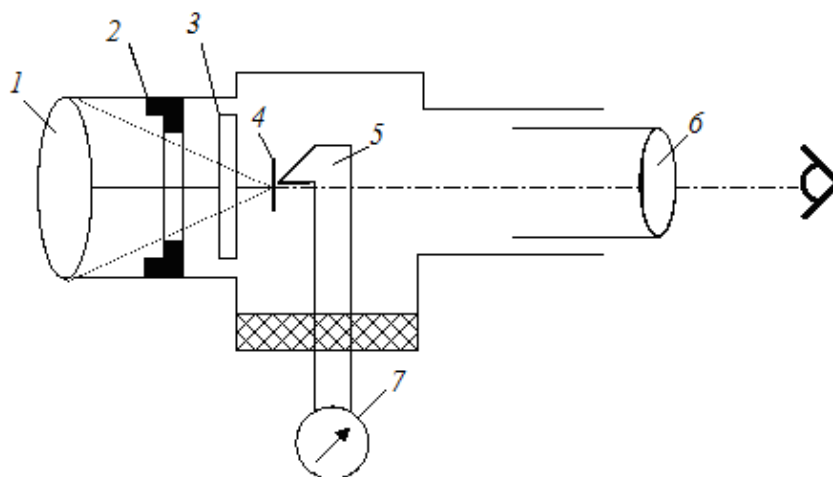


Рис. 2.19. Схема радиационного пирометра

С помощью оптической системы 6 пирометр наводится на нагретое тело. При этом поток электромагнитного излучения, ограниченный диафрагмой 2, фокусируется с помощью линзы 1 на теплоприемнике 4, температура которого измеряется с помощью термобатарей 5 и прибора вторичного 7. ТермоЭДС батареи измеряется милливольтметром или потенциометром. Для уменьшения интенсивности излучения, приходящего на теплоприемник, установлен серый светофильтр 3.

Классы точности радиационных пирометров – 1,0 и 1,5. Чтобы предупредить перегрев пирометра, корпус помещается в кожух с водяным охлаждением.

Выпускаются пирометры излучения с дистанционной системой передачи показаний, а также снабженные высокоскоростными микропроцессорами с аналоговыми 4–20 мА и цифровыми выходными сигналами.

## 2.6. Преобразователи измерительные (нормирующие)

Преобразователи измерительные (нормирующие) предназначены для преобразования термоЭДС ТЭП и сопротивления термометров сопротивления в унифицированный электрический сигнал постоянного тока в соответствии с требованиями ГСП ( $0 \div 5$  и  $4 \div 20$  мА,  $0 \div 12$  В).

Действие преобразователей основано на статической автокомпенсации. Схема преобразователя, работающего в комплекте с ТЭП, приведена на рис. 2.20.

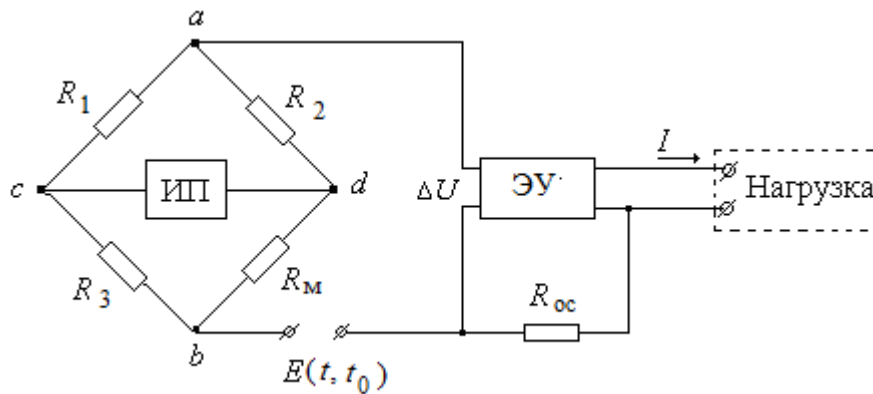


Рис. 2.20. Схема измерительного преобразователя, работающего в комплекте с ТЭП

В измерительную диагональ моста  $ab$  последовательно с электронным усилителем ЭУ с помощью соединительных проводов подсоединен ТЭП.

Для введения автоматической поправки на температуру холодных спаев в плечо  $bd$  включено медное сопротивление  $R_M$ , поэтому напряжение  $U_{ab}$  содержит поправку на температуру холодных спаев термопары.

Электронный усилитель охвачен жесткой обратной связью в виде резистора  $R_{oc}$ , что обеспечивает линейное преобразование входного сигнала  $\Delta U = E(t, t_0) - U_{ab}$  в постоянный ток  $I = k_1 \Delta U$ . В состоянии равновесия между выходным током преобразователя  $I$  и термоЭДС ТЭП имеет место линейная однозначная зависимость  $I = kE(t, t_0)$ , рис. 2.21.

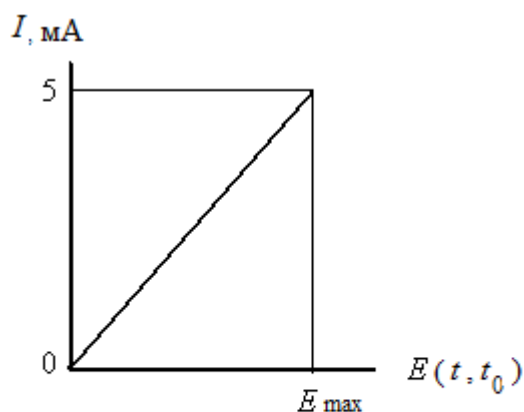


Рис. 2.21. Статическая характеристика нормирующего преобразователя термоЭДС ТЭП

В состав измерительного комплекта для измерения температуры нагретого тела с помощью термоэлектрического преобразователя входят нормирующий преобразователь и нагрузка (см. рис. 2.22). В качестве нагрузки может быть использован вторичный измерительный прибор (миллиамперметр), электропневматический преобразователь, сигнализатор и автоматический регулятор.

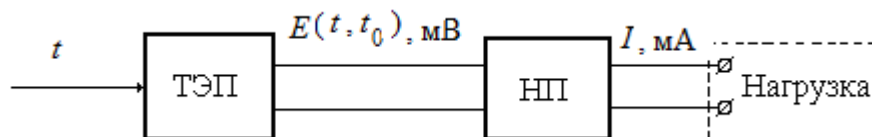


Рис. 2.22. Измерительный комплект ТЭП с НП

Схема преобразователя, работающего в комплекте с термометром сопротивления, приведена на рис. 2.23.

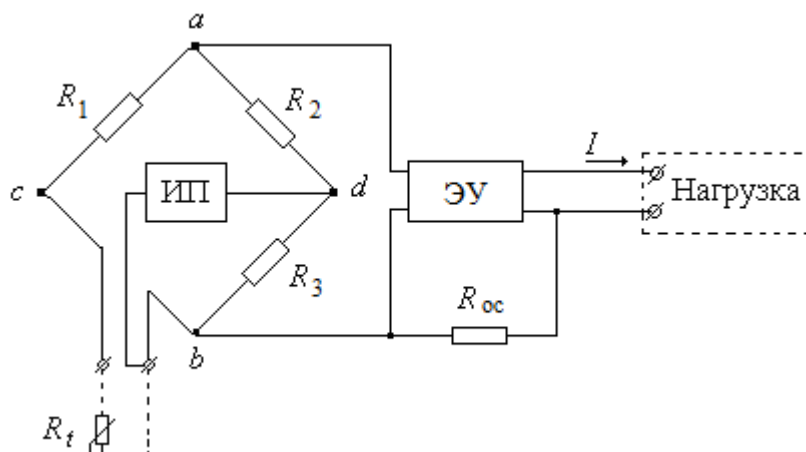


Рис. 2.23. Схема измерительного преобразователя, работающего с термометром сопротивления

В плечо неуравновешенного моста по трехпроводной схеме включен термометр сопротивления  $R_t$ , поэтому  $U_{ab} = k_M R_t$ . В измерительную диагональ моста включен электронный усилитель ЭУ, охваченный жесткой обратной связью в виде резистора  $R_{oc}$ , что обеспечивает линейное преобразование входного сигнала  $U_{ab}$  в усилитель в постоянный ток  $I = k U_{ab}$ . В состоянии равновесия  $I = k k_M R_t$ .

Как и в предыдущем случае, получили линейный преобразователь сопротивления термометра в нормированный токовый сигнал (рис. 2.24).

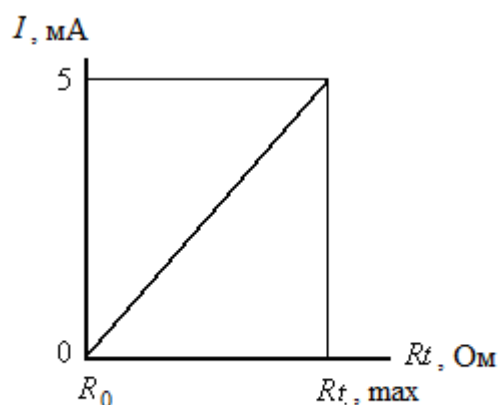


Рис. 2.24. Статическая характеристика нормирующего преобразователя для ТС

В состав измерительного комплекта для измерения температуры нагретого тела с помощью электрического термометра сопротивления входят нормирующий преобразователь и нагрузка (рис. 2.25).

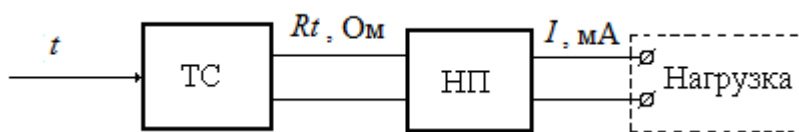


Рис. 2.25. Измерительный комплект термометра сопротивления с НП

В качестве нагрузки может быть использован вторичный измерительный прибор (миллиамперметр), электропневматический преобразователь, сигнализатор и автоматический регулятор.

Нормирующие преобразователи имеют классы точности  $0,6 \div 1,5$ .

Первичные преобразователи ТЭП и ТС располагаются на объекте, а нормирующие преобразователи и устройства, выполняющие функции нагрузки, монтируются на щите.

### 3. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Системы передачи измерительной информации предназначены для сбора информации о параметрах объекта и передачи её на щит оператора или в системы автоматического регулирования. Системы дистанционной передачи позволяют передавать информацию на расстояние до нескольких десятков километров.

В зависимости от вида энергии носителя информации системы делятся на электрические, пневматические и гидравлические.

#### 3.1. Электрические системы передачи информации

Электрические системы предназначены для преобразования выходных сигналов первичных преобразователей типа «перемещение» или «сила» в аналоговые или частотные сигналы и передачи информации об измеряемой величине на прибор вторичный, расположенный на щите.

**В дифференциально-трансформаторных системах** перемещение выходного элемента первичного преобразователя ПП передается на сердечник  $I$  дифференциального трансформатора – датчика ДТД (рис. 3.1).

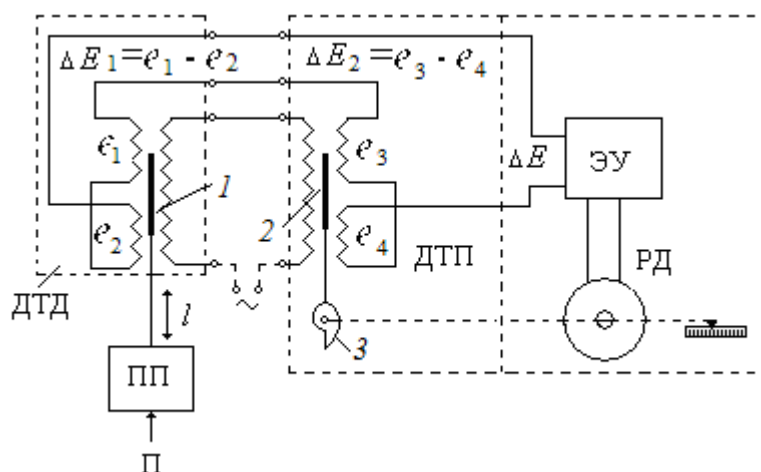


Рис. 3.1. Схема дифференциально-трансформаторной системы

При перемещении сердечника  $1$  относительно вторичных обмоток в них индуцируется ЭДС. Так как обмотки включены встречно, то выходной сигнал трансформатора  $\Delta E_1 = e_1 - e_2$  зависит от положения сердечника относительно вторичных обмоток. Дифференциальный трансформатор-приемник ДТП имеет аналогичное устройство. Выходной сигнал ДТП зависит от положения сердечника  $2$  и равен  $\Delta E_2 = e_3 - e_4$ . Если сердечники  $1$  и  $2$  находятся в одинаковом положении, то разность  $\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2 = 0$ . При изменении параметра  $\Pi$  плунжер займет новое положение относительно обмоток ДТД, изменится выходной сигнал  $\Delta E_1$  и на вход электронного усилителя поступит сигнал небаланса  $\Delta E$ . Этот сигнал усиливается до значения, необходимого для управления реверсивным двигателем РД. Выходной вал РД с помощью профильного кулачка  $3$  переместит сердечник  $2$  до положения, при котором наступит равновесие  $\Delta E = 0$ , то есть сердечник  $2$  займет такое же положение, как сердечник  $1$ . Одновременно с кулачком перемещается стрелка вторичного прибора, шкала которого имеет градуировку в единицах измерения параметра. Кулачки имеют профиль, описываемый линейной или квадратичной зависимостью. Последние используются при измерении расхода по методу переменного перепада давления. Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы построены на базе автоматических потенциометров.

Для передачи угловых перемещений выходных элементов первичных преобразователей (рис. 3.2) используются два **ферродинамических преобразователя**, имеющих магнитопроводы  $1$  и  $4$  с обмотками возбуждения  $2$  и  $5$  и рамки  $3$  и  $6$ , соответственно.

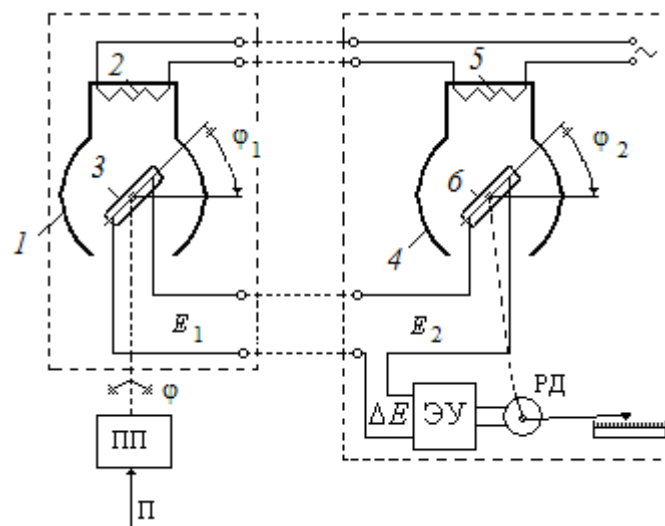


Рис. 3.2. Принципиальная схема дистанционной передачи с ферродинамическими преобразователями

При питании обмотки возбуждения 2 переменным током в магнитопроводе 1 возбуждается магнитный поток, индуктирующий в рамке 3 ЭДС, пропорциональную углу поворота рамки. Рамка 3 соединена с выходным элементом первичного преобразователя, поэтому для каждого значения измеряемого параметра в рамке будет индуктироваться определенная ЭДС  $E_1$ . Рамка 6 связана с выходным валом реверсивного двигателя РД. Если рамки 3 и 6 находятся в одинаковом положении, то в них индуктируются одинаковые ЭДС и  $\Delta E = E_1 - E_2 = 0$ . Система находится в равновесии. При изменении параметра  $\Pi$  рамка 3 повернется на угол  $\varphi$  и изменится величина индуктированной ЭДС  $E_1$ , что приведет к появлению разности ЭДС  $\Delta E \neq 0$  на входе в электронный усилитель. Этот сигнал усиливается до значения, необходимого для управления реверсивным двигателем РД. Выходной вал реверсивного двигателя повернет рамку 6 до состояния равновесия  $\Delta E = 0$ . Одновременно перемещается стрелка вторичного прибора, шкала которого отградуирована в единицах измерения параметра  $\Pi$ .

Для передачи сигналов первичных преобразователей в виде нескольких оборотов выходного элемента используются **сельсинные передачи** (рис. 3.3).



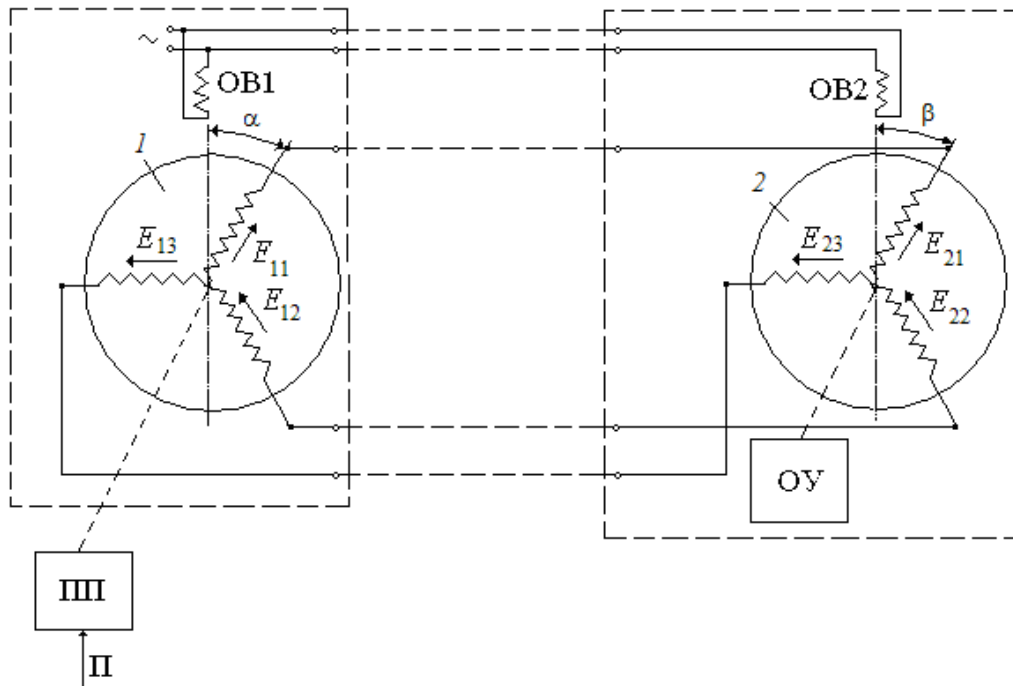


Рис. 3.3. Схема сельсинной системы передачи информации

Система передачи имеет два сельсина, представляющие собой трехфазные электрические микромашины. Ротор сельсина 1 связан с выходным элементом первичного преобразователя. Обмотка возбуждения питается переменным напряжением, поэтому в обмотках синхронизации магнитный поток будет индуцировать переменные ЭДС:

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_{\max} \cos \alpha ; \\ E_{12} &= E_{\max} \cos(\alpha + 120^\circ); \\ E_{13} &= E_{\max} \cos(\alpha + 240^\circ), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $E_{\max}$  – наибольшее действующее значение ЭДС;  $\alpha$  – угол поворота ротора сельсина.

Если обмотки синхронизации сельсинов 1 и 2 расположены одинаково относительно осей обмоток возбуждения  $\alpha = \beta$ , то в фазах обмоток синхронизации обоих сельсинов будут индуцироваться одинаковые ЭДС, уравнивающие друг друга. При этом синхронизирующий момент равен нулю. При изменении параметра  $\Pi$  ротор сельсина 1 повернется на угол  $\varphi$  от согласованного положения и нарушится равновесие ЭДС обмоток синхронизации. В результате между одноименными зажимами обмоток возникают ЭДС, равные разностям ЭДС соответствующих фаз сельсина-датчика 1 и сельсина-приемника 2. По обмоткам синхронизации проходят токи, которые создают в каждом сельсине

синхронизирующий момент  $M$ , пропорциональный синусу угла  $\varphi$ :

$$M = M_{\max} \sin \varphi, \quad (3.2)$$

где  $M_{\max}$  – наибольший синхронизирующий момент при  $\varphi = 90^\circ$ .

Синхронизирующий момент поворачивает обмотку сельсина-приемника, связанного с отсчетным устройством ОУ, до состояния равновесия  $\beta = \alpha$ .

Абсолютная погрешность сельсинов-датчиков  $\pm(0,25; 0,5; 1,0)$  град, сельсинов-приемников  $\pm(0,75; 1,5; 2,5)$  град. Расстояние между сельсином-приемником и сельсином-датчиком – до 2–3 км.

Кроме указанных выше, используются электрические системы передачи измерительной информации с выходным унифицированным токовым сигналом, оснащенные преобразователями «сила – ток» или «перемещение – ток», электрические системы передачи измерительной информации с выходным унифицированным частотным сигналом [7, 8, 14].

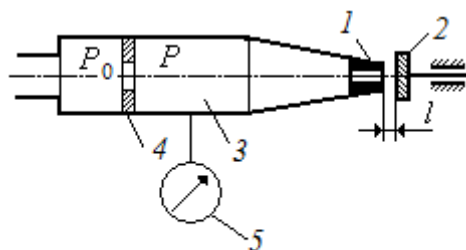


Рис. 3.4. Схема управляемого пневмосопротивления

### 3.2. Пневматические системы передачи информации

Пневматические системы передачи измерительной информации используются для передачи показаний измерительных приборов и преобразователей в тех случаях, когда использование электрических систем по условиям техники безопасности не допускается.

Основным элементом пневматической системы является управляемое пневмосопротивление типа «сопло-заслонка», преобразующее сигнал типа «перемещение» в пневматический сигнал (рис. 3.4).

Преобразователь типа «сопло – заслонка» состоит из сопла 1 и заслонки 2. В камеру 3 через дроссель постоянного сопротивления 4 подается сжатый воздух под давлением  $P_0 = 140$  кПа. При перемещении заслонки изменяется пневматическое сопротивление управляемого сопротивления и давление  $P$  в камере 3, измеряемое манометром 5. Зависимость давления  $P$  от положения заслонки 1 относительно сопла однозначная, нелинейная, обратная (рис. 3.5). Для линеаризации этой зависимости используется жесткая обратная связь (см. рис. 3.6).

Первичный преобразователь ПП преобразует измеряемую величину  $\Pi$  в усилие  $F$ , которое через тягу  $1$  передается к левому плечу рычага  $2$  и образует момент вращения  $M_1 = l_1 F$ , поворачивающий рычаг  $3$  по часовой стрелке. Заслонка  $4$  приближается к соплу  $5$ . Сопротивление выходу воздуха увеличивается, и возрастает давление  $P$  в камере сопла. Это давление усиливается по мощности усилителем  $6$  и поступает в сильфон обратной связи  $7$  и на выход. Выходное давление  $P_{\text{вых}}$  будет увеличиваться до тех пор, пока момент силы, развиваемый сильфоном  $M_2 = l_2 F_{\text{ос}}$ , где  $F_{\text{ос}} = S_{\text{эф}} P_{\text{вых}}$ , не станет равным сумме моментов  $M_1$  и  $M_3$ :

$$M_3 = F_{\text{пр}} l_3 = \delta_{\text{пр}} l_{\text{пр}} l_3, \quad (3.3)$$

где  $\delta_{\text{пр}}$  – жесткость пружины  $\delta$  корректора нуля;  $l_{\text{пр}}$  – величина растяжения пружины корректора нуля.

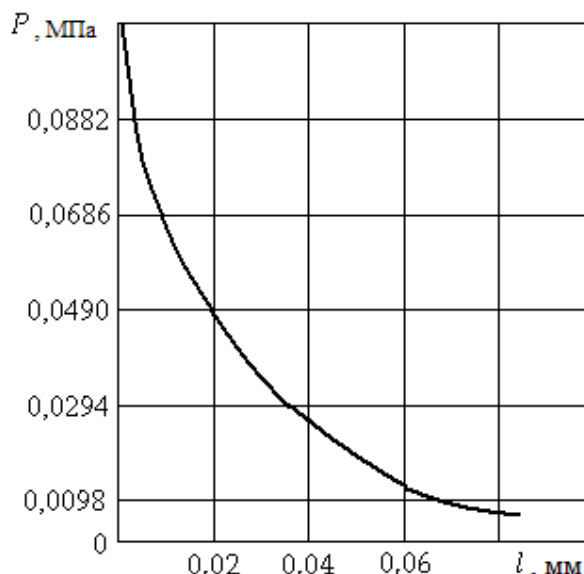


Рис. 3.5. Зависимость давления в камере 3 от положения заслонки 2

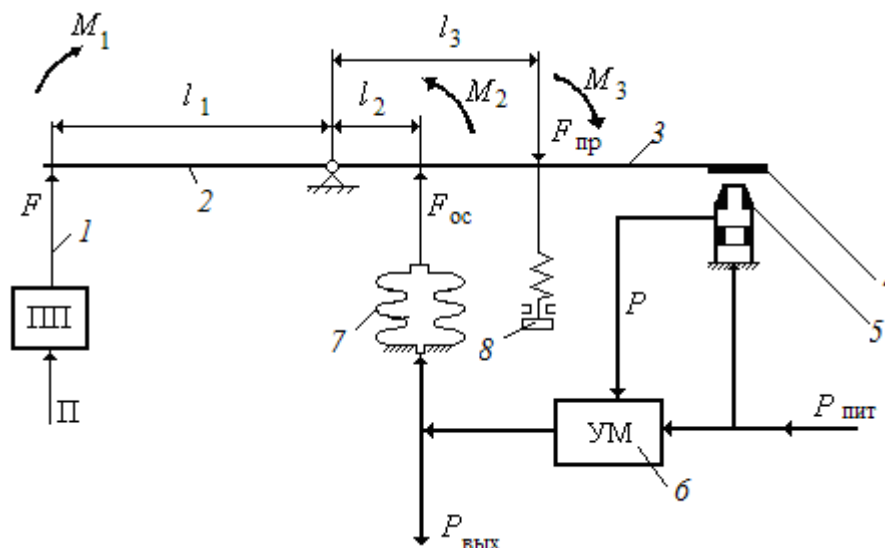


Рис. 3.6. Типовая схема пневматического преобразователя силовой компенсации

Запишем уравнение равновесия преобразователя

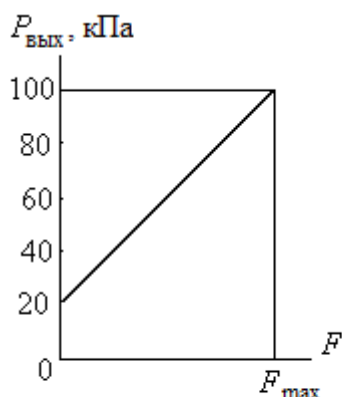


Рис. 3.7. Статическая характеристика пневматического преобразователя

$$M_1 - M_2 + M_3 = 0 \quad (3.4)$$

и подставим в него выражения моментов сил:

$$Fl_1 - S_{эф}P_{вых}l_2 + \delta_{пр}l_{пр}l_3 = 0. \quad (3.5)$$

Отсюда находим

$$P_{вых} = \frac{l_1}{S_{эф}l_2}F + \frac{\delta_{пр}l_{пр}l_3}{S_{эф}l_2}. \quad (3.6)$$

Так как диапазон изменения унифицированного пневматического сигнала 20÷100 кПа, то при  $F = 0$  выходное давление  $P_{вых,0}$  должно быть равным 20 кПа. В результате зависимость (3.6) может быть представлена в виде

$$P_{вых} = kF + 20. \quad (3.7)$$

Таким образом, пневматический преобразователь имеет линейную зависимость выходного давления от приложенной силы (см. рис. 3.7). Начальное давление 20 кПа устанавливается корректором 8 начала шкалы при  $F = 0$  путем изменения степени натяжения пружины.

Выходное давление измеряется вторичными приборами, принцип действия которых основан на компенсации измеряемого давления известным усилием (рис. 3.8).

Измеряемое давление  $P_{вх}$  подается внутрь сильфона 1, преобразующего давление в силу  $F$ , под действием которой развивается вращающий момент  $M_1 = l_1F$ . Рычаг 2 начинает поворачиваться и заслонка 3 приближается к соплу 4. Это приводит к повышению давления в силовом преобразователе 5. Чашеобразная мембрана преобразователя поворачивает рычаг 6, свободный конец которого тянет нить 7, растягивающую пружину 8. В результате упругой деформации пружины на рычаге 2 развивается момент силы  $M_2 = \delta_{пр}\Delta l_2$ , уравнивающий действие момента  $M_1$ . В состоянии равновесия  $M_2 = M_1$  и

$$\delta_{пр}\Delta l_2 = S_{эф}P_{вх}l_1, \quad (3.8)$$

где  $\delta_{пр}$  – жесткость пружины 8;  $\Delta l$  – деформация пружины 8;  $S_{эф}$  – эф-

фективная поверхность сиффона 1.

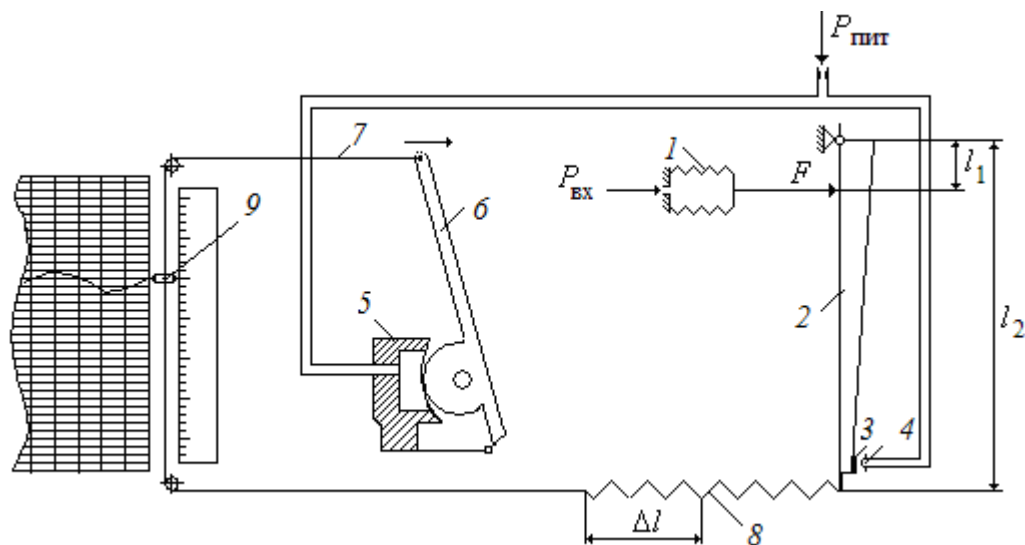


Рис. 3.8. Схема вторичного измерительного прибора

Преобразуем равенство (3.8):

$$\Delta l = \frac{S_{\text{эф}} l_1}{\delta_{\text{пр}} l_2} P_{\text{вх}}, \quad (3.9)$$

или

$$\Delta l = k P_{\text{вх}}. \quad (3.10)$$

Таким образом, величина деформации пружины 8 пропорциональна измеряемому давлению  $P_{\text{вх}}$ , поэтому стрелка прибора 9 крепится к нити 7, и перемещение стрелки относительно шкалы также будет пропорционально измеряемому давлению. Класс точности преобразователя – 1,0.

Пневматические преобразователи обеспечивают передачу выходного сигнала по пневматической линии связи до 300 м. При превышении этого расстояния пневмопровод будет вносить значительные искажения в передаваемый сигнал (9.14).

### 3.3. Пневмоэлектрические преобразователи

Пневмоэлектрические преобразователи предназначены для преобразования унифицированного пневматического сигнала в унифицированный сигнал постоянного тока. Наибольшее распространение получили преобразователи (ПЭП), работающие на принципе компенсации моментов сил (рис. 3.9).

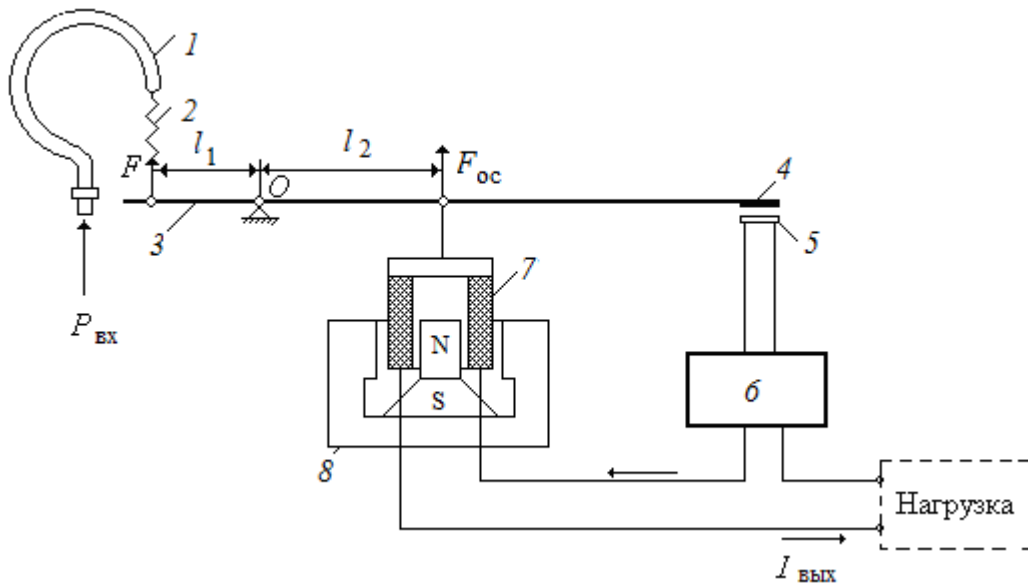


Рис. 3.9. Принципиальная схема пневмоэлектрического преобразователя

Входное давление  $P_{\text{ВХ}}$  поступает в одновитковую трубчатую пружину 1. В результате свободный конец пружины перемещается вверх на величину  $\Delta l = k_1 P_{\text{ВХ}}$  и растягивает пружину 2. Возникающая при этом сила упругой деформации  $F = \delta_{\text{пр}} \Delta l$  передается на рычаг 3 и образует момент вращения  $M_1 = F l_1$ , стремящийся повернуть рычаг вокруг точки О. При повороте рычага флажок 4 приближается к плоской катушке 5, что приводит к увеличению ее индуктивного сопротивления, которое устройством 6 преобразуется в сигнал постоянного тока  $I_{\text{ВЫХ}}$ . Ток  $I_{\text{ВЫХ}}$  поступает на выход преобразователя и в катушку 7 электросилового преобразователя 8.

В результате взаимодействия электромагнитного поля катушки с магнитным полем постоянного магнита на катушку 7 действует сила  $F_{\text{ос}} = k_2 I_{\text{ВЫХ}}$ . Эта сила передается на рычаг 3 и создает момент вращения  $M_2 = F_{\text{ос}} l_2$ , компенсирующий действие момента  $M_1$ . В состоянии равновесия  $M_2 = M_1$ . Тогда

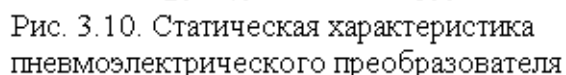
$$k_2 I_{\text{ВЫХ}} l_2 = k_1 \delta_{\text{пр}} P_{\text{ВХ}}. \quad (3.11)$$

Отсюда 
$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{k_1 \delta_{\text{пр}}}{k_2 l_2} P_{\text{ВХ}}, \quad (3.12)$$

или

$$I_{\text{ВЫХ}} = k P_{\text{ВХ}}, \quad (3.13)$$

Таким образом, зависимость между выходным токовым сигналом и входным давлением имеет линейный характер (рис. 3.10). Класс точности преобразователя – 1,0.



Электропневматические преобразователи предназначены для преобразования унифицированного сигнала постоянного тока в унифицированный пневматический сигнал. Широкое распространение получили электропневматические преобразователи (ЭПП), действие которых основано на принципе компенсации усилий (рис. 3.11).

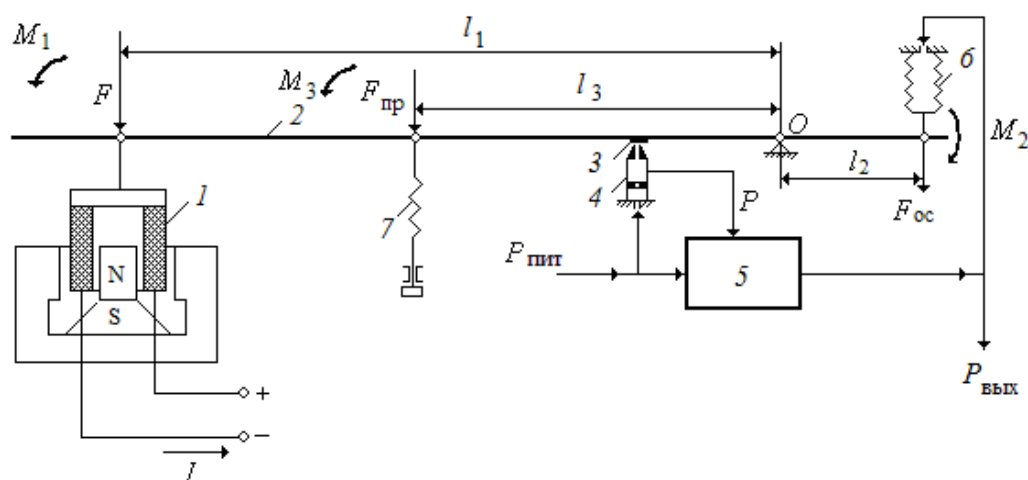


Рис. 3.11. Принципиальная схема электропневматического преобразователя

Входной унифицированный сигнал постоянного тока  $I$  поступает на катушку 1 магнитоэлектрического преобразователя. В результате взаимодействия электромагнитного поля катушки с магнитным полем постоянного магнита создается усилие  $F = k_1 I$ , развивающее момент вращения  $M_1 = F l_1$ , под действием которого рычаг 2 поворачивается. Заслонка 3 приближается к соплу 4, что приводит к повышению давле-

ния  $P_{\text{вых}}$  на выходе усилителя мощности 5, которое также поступает в сильфон обратной связи 6 и создает усилие  $F_{\text{ос}} = S_{\text{эф}} P_{\text{вых}}$ . Это усилие развивает компенсирующий момент вращения  $M_2 = F_{\text{ос}} l_2$ . В состоянии равновесия справедливо равенство

$$M_1 - M_2 + M_3 = 0, \quad (3.14)$$

где  $M_3 = \delta_{\text{пр}} \Delta l_3$  – момент вращения, развиваемый пружиной 7.

Из равенства (3.14) следует, что  $k_1 l_1 - S_{\text{эф}} P_{\text{вых}} l_2 + \delta_{\text{пр}} \Delta l_3 = 0$  и

$$P_{\text{вых}} = \frac{k_1 l_1}{S_{\text{эф}} l_2} I + \frac{\delta_{\text{пр}} \Delta l_3}{S_{\text{эф}} l_2} = kI + 20. \quad (3.15)$$

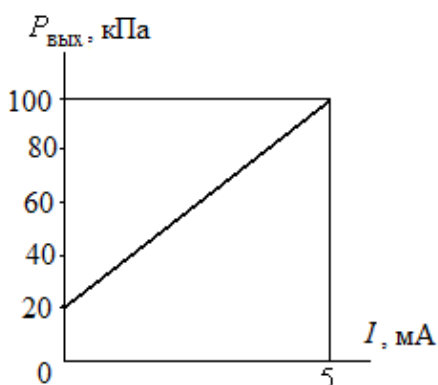


Рис. 3.12. Статическая характеристика электропневматического преобразователя

Таким образом, между унифицированным пневматическим сигналом и унифицированным сигналом постоянного тока имеет место линейная зависимость (рис. 3.12). Классы точности преобразователей – 1,0 и 1,5.

Установка начального давления ( $P_{\text{вых}} = 20$  кПа) производится с помощью пружины 7.

### 3.5. Построение измерительных комплектов температуры

Измерительные комплекты могут создаваться с целью получения информации различного назначения: для зрительного восприятия оператором; для записи на дисковой или ленточной диаграмме; для ввода в регуляторы, вычислительные, сигнализирующие и другие устройства. При этом обязательно учитываются пожаро- и взрывоопасные условия производства.

Для контроля и управления пожаро- и взрывобезопасными производствами обычно используются приборы электрической ветви (см. рис. 2.5, 2.11, 2.15, 2.22, 2.25). В случае формирования информационного сигнала для управления технологическим процессом токовый унифицированный сигнал обычно подается на вход автоматического регулятора.

Для контроля и управления пожаро- и взрывоопасными производст-



вами обычно используются пневматические устройства (рис. 3.13).

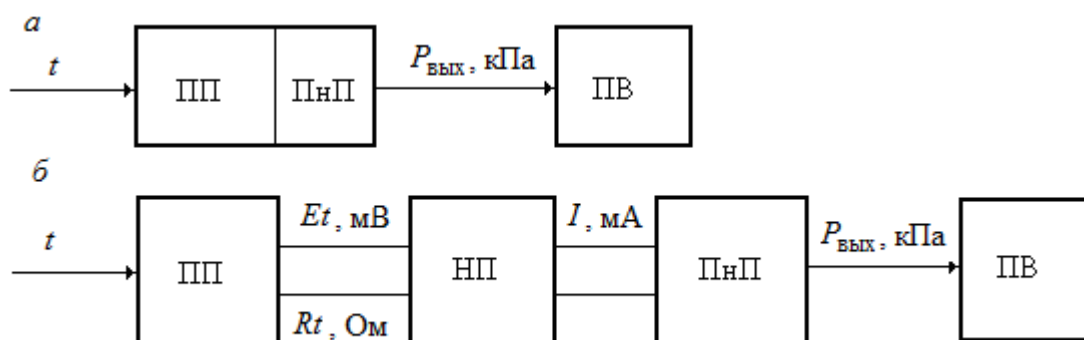


Рис. 3.13. Измерительные комплексы для измерения температуры во взрывоопасных производствах

Промышленностью выпускаются измерительные преобразователи температуры, например типа 13ТД73, которые преобразуют измеряемую температуру в унифицированный пневматический сигнал (см. рис. 3.13, а), измеряемый вторичным измерительным прибором ПВ, расположенным на щите контроля. Если в качестве первичных преобразователей температуры ПП используются термоэлектрические преобразователи или термометры сопротивления (см. рис. 3.13, б), то соответствующий выходной сигнал последовательно проходит нормирующий преобразователь НП, пневматический преобразователь ПнП и поступает на вход вторичного измерительного прибора ПВ, позволяющего проводить визуальные наблюдения за изменением температуры и регистрировать на ленточной диаграмме. Для формирования системы автоматического регулирования прибор вторичный должен иметь станцию управления и пневматический разъем, предназначенный для подключения устройства регулирующего (Комплекс «СТАРТ»).

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

**Под давлением понимается действие силы, направленной перпендикулярно к поверхности, на единицу площади этой поверхности.** Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум. Связь между давлениями обычно описывают известным выражением:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}}. \quad (4.1)$$

**Приборы для измерения давления носят общее название «манометры».**

В Международной системе единиц (СИ) за единицу давления принят **Паскаль (Па)**. Это давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  и направленной по нормали к ней. В химической технологии наиболее часто для измерения давления используется внесистемная единица кгс/см<sup>2</sup>, равная 0,1 МПа.

По принципу действия манометры делятся на жидкостные, деформационные, электрические и т. д.

### 4.1. Жидкостные манометры

**Действие приборов основано на компенсации измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости.** В химической технологии применяются поплавковые и колокольные манометры.

**Поплавковые манометры** применяются для измерения избыточного давления и разности давлений (дифференциальные манометры). Поплавковые манометры состоят из двух сообщающихся сосудов разного диаметра (рис. 4.1), заполненных рабочей жидкостью.

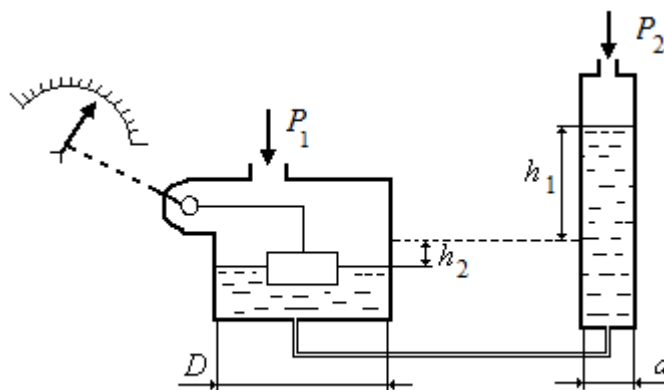


Рис. 4.1. Схема поплавкового дифманометра

На поверхности рабочей жидкости сосуда диаметром  $D$  плавает поплавок. В сосуд диаметром  $D$  подается давление  $P_1$ , а в сосуд диа-

метром  $d$  подается давление  $P_2$ . При этом  $P_1 > P_2$ . Под действием разности давлений жидкость из сосуда большего диаметра перемещается в сосуд меньшего диаметра до наступления равновесия сил:

$$P_1 - P_2 = q(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}})(h_1 + h_2), \quad (4.2)$$

где  $q$  – ускорение свободного падения;  $h_1$  и  $h_2$  – перемещение уровня жидкости в правом и левом коленах;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность рабочей жидкости;  $\rho_{\text{с}}$  – плотность измеряемой среды.

Используя закон сохранения вещества, запишем:

$$h_2 \pi D^2 / 4 = h_1 \pi d^2 / 4. \quad (4.3)$$

Преобразуем уравнение (4.2) с учетом выражения (4.3):

$$P_1 - P_2 = ((D/d)^2 + 1)(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}})h_2 = kh_2. \quad (4.4)$$

Таким образом, зависимость разности давлений ( $P_1 - P_2$ ) от изменения уровня в левом колене и перемещения поплавка линейная. Перемещение поплавка передается на отсчетное устройство или на вход преобразователя перемещения в унифицированный сигнал измерительной информации.

Поплавковые дифманометры имеют сменные сосуды диаметром  $d$  для изменения предельного значения измеряемого перепада давления от 6,3 кПа до 0,10 МПа. Класс точности поплавковых дифманометров – 1,0 и 1,5.

**Колокольные дифманометры (КД)** используются для измерения малых перепадов давлений. КД представляет собой колокол, погруженный в сосуд с жидкостью (рис. 4.2). Под колокол подводится давление  $P_1$ , а над колоколом – давление  $P_2$ .

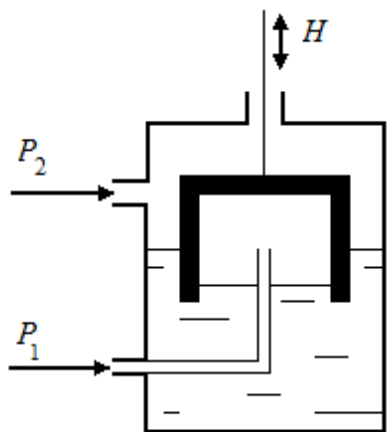


Рис. 4.2. Колокольный дифманометр

Под действием разности давлений колокол будет подниматься, так как на него действует направленная вверх сила  $F = (P_1 - P_2)S$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения колокола.

Действие силы  $F$  можно компенсировать гидростатической подъемной силой, действующей на колокол согласно закону Архимеда, уравновешивающим грузом или силой упругой деформации пружины. В последнем случае колокол подвешивается на постоянно растянутую винтовую пружину. Перемещение колокола  $H$  передается на приемник дифференциально-трансформаторной

системы. В зависимости от величины измеряемого перепада давления устанавливают колокол с грузом определенной массы и винтовую пружину.

жину соответствующей жесткости. Дифманометры выпускаются на предельные номинальные перепады давления 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0 кПа. Класс точности – 1,5.

Если принять  $P_2 = P_{\text{атм}}$ , то дифференциальными манометрами можно измерять избыточное давление в объекте.

Измерительный комплект для измерения перепада давления с помощью жидкостных дифференциальных манометров может состоять из дифференциального манометра ДМ со встроенным преобразователем перемещения (Пр) в электрический сигнал и вторичного прибора (рис. 4.3, а) или дифференциального манометра ДМ со встроенным преобразователем перемещения (Пр) в пневматический сигнал (рис. 4.3, б) и вторичного прибора ПВ.

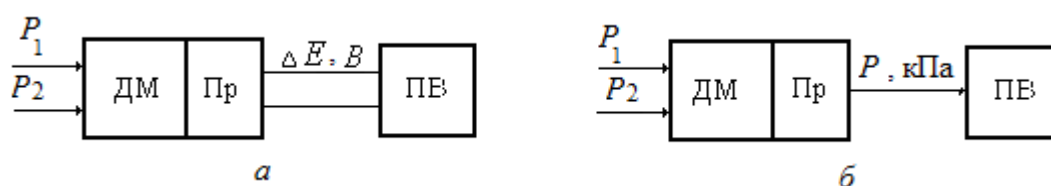


Рис. 4.3. Измерительные комплекты для измерения перепада давления жидкостными приборами

## 4.2. Деформационные манометры

**Действие приборов основано на зависимости величины упругой деформации упругого элемента или развиваемой им силы от поданного в него давления.** В зависимости от типа упругого элемента деформационные манометры делятся на следующие группы: приборы с трубчатой пружиной, мембранные и сильфонные приборы.

**Приборы с трубчатыми пружинами** в качестве упругого чувствительного элемента (первичного преобразователя) имеют одновитковую трубчатую пружину или многовитковую (геликоидальную) трубчатую пружину (пружину Бурдона). Трубчатая пружина (см. рис. 4.4) представляет собой металлическую согнутую по дуге трубку  $l$  эллиптического или плоскоовального сечения, один конец которой закреплен на держателе 2, а свободный конец запаян. Под действием поданного давления пружина раскручивается, так как малая ось трубки увеличивается, а длина трубки остается постоянной. Перемещение свободного конца трубки и развиваемая сила в пределах упругой деформации пропорциональны поданному давлению:

$$\Delta l = k_1 P; \quad (4.5)$$

$$F = k_2 P. \quad (4.6)$$

Важнейшей характеристикой трубки является предел пропорциональности. Это предельное давление, при котором сохраняются линейные зависимости (4.5) и (4.6), поэтому максимальное рабочее давление назначают ниже предела пропорциональности. Для передачи величины перемещения свободного конца трубки на отсчетное устройство обычно используются зубчато-секторные передаточные механизмы.

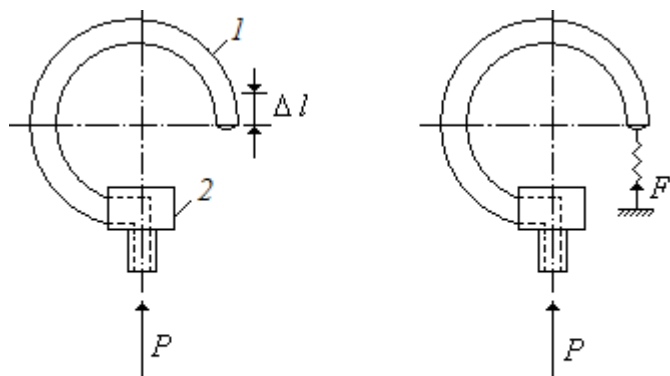


Рис. 4.4. Прибор с одновитковой трубчатой пружиной

Для измерения давлений до 5 МПа трубчатые пружины изготавливают из латуни, томпака, бронзы; для измерения более высоких давлений – из легированных сталей и сплавов.

Манометры показывающие и самопишущие с одновитковой трубчатой пружиной выпускаются для

измерения избыточного давления и разрежения неагрессивных жидких и газообразных сред в обыкновенном, виброустойчивом, антикоррозионном, пыле-, брызго- и взрывозащищенном исполнении. Класс точности – 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Для увеличения угла поворота свободного конца используются многovitковые трубчатые пружины. При этом возможно осуществлять показания и запись измеряемого давления и разрежения.

**Приборы с мембранными** чувствительными элементами (первичными преобразователями) применяются для измерения атмосферного и избыточного давлений и разрежения.

Мембрана представляет диск, закрепленный между фланцами. Мембраны бывают жесткие и вялые.

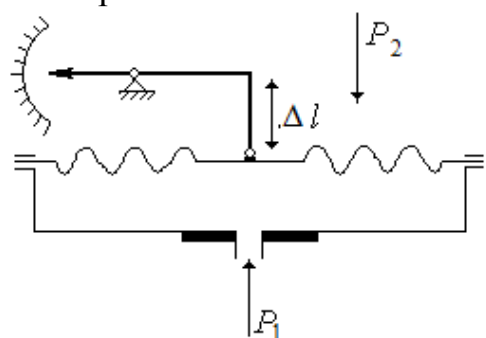


Рис. 4.5. Мембранный манометр

Жесткие мембраны изготавливаются из специальных сплавов и нержавеющей стали (рис. 4.5). Под действием давления или перепада давления мембрана прогибается на величину  $\Delta l$ .

Величина прогиба мембраны зависит от давления, геометрических параметров, модуля упругости материала, от числа, формы и размера гофров, поэтому характеристики мембран подбираются

опытным путем. Для увеличения прогиба мембраны соединяются в мембранные коробки (рис. 4.5, а), а мембранные коробки – в мембранные

блоки (рис. 4.6, б), внутренние полости которых заполнены жидкостью.

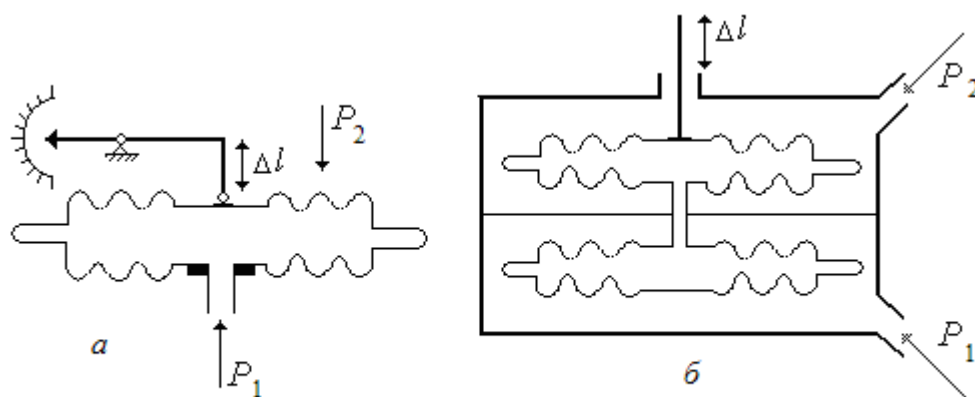


Рис. 4.6. Мембранные дифманометры

Вялые мембраны изготавливаются из эластичных материалов: из резины с тканевой основой, из ткани с газонепроницаемой пропиткой или из особых пластмасс. Манометр с вялой мембраной 1 имеет цилиндрическую винтовую пружину 2 для компенсации силы, развиваемой мембраной под действием давления (рис. 4.7).

Принцип действия приборов с вялой мембраной состоит в преобразовании измеряемого давления или разрежения в перемещение жесткого центра 3 мембраны, которое с помощью передаточного механизма передается на отсчетное устройство или в преобразователь перемещения в нормированный сигнал.

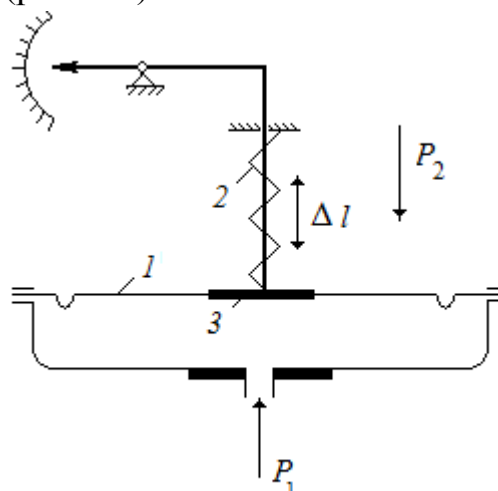


Рис. 4.7. Манометр с вялой мембраной

Выпускаются показывающие и самопишущие мембранные манометры, а также мембранные тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры. Класс точности – 1,5 или 2,5.

Мембранные чувствительные элементы используются в качестве первичных преобразователей давления или перепада давления в измерительных преобразователях с унифицированным электрическим или пневматическим выходным сигналом. В последнем случае осуществляется компенсация усилия, развиваемого мембраной или мембранным блоком под действием измеряемого давления или перепада давления. **Приборы с пьезоэлектрическими чувствительными элементами** применяются для измерения избыточного давления и перепада давления.

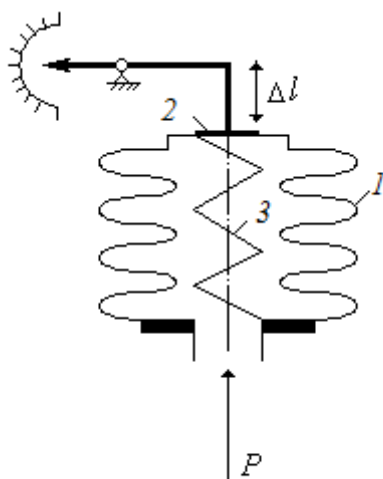


Рис. 4.8. Сильфонный манометр

зается для преобразования давления или перепада давления в силу, развиваемую доннышком:

$$F = S_{\text{эф}} \Delta P, \quad (4.7)$$

где  $S_{\text{эф}} = \pi (R_{\text{н}} + R_{\text{в}})^2 / 4$  – эффективная поверхность сильфона;  $R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{в}}$  – наружный и внутренний радиусы сильфона. Развиваемое усилие  $F$  преобразуется в нормированный токовый или пневматический сигнал.

Выпускаются показывающие и самопишущие сильфонные манометры, а также сильфонные тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры. Класс точности – 1,5 или 2,5.

**Измерительные преобразователи давления** – бесшкальные приборы, предназначенные для преобразования перемещения упругого чувствительного элемента под действием измеряемого давления жидкости, газа и пара в токовый или пневматический сигнал, поступающий затем на прибор вторичный или на вход автоматического регулятора системы управления. Класс точности – 0,6; 1,0 или 1,5.

**Измерительные преобразователи перепада давления** – бесшкальные приборы, предназначенные для получения унифицированного сигнала о расходе жидкости, газа или пара по перепаду давления на сужающем устройстве, а также для измерения перепада давления и уровня жидкости в сосуде, находящемся под атмосферным, избыточным или вакуумметрическим давлением. Класс точности – 0,6; 1,0 или 1,5.

Измерительные комплекты для измерения давления или перепада давления с помощью мембранных и сильфонных приборов по составу аналогичны представленным на рис. 4.3.

### 4.3. Электрические манометры

Электрические манометры предназначены для прямого или косвенного преобразования давления в электрический параметр, функционально связанный с давлением. К ним относятся манометры сопротивления, пьезоэлектрические, емкостные, ионизационные и радиоизотопные манометры.

Действие *манометров сопротивления* основано на зависимости электрического сопротивления проводника от измеряемого давления. Применяются для измерения высоких и сверхвысоких давлений. В качестве чувствительного элемента используется катушка из манганиновой проволоки, сопротивление которой можно измерять с помощью уравновешенного моста.

Действие *пьезоэлектрических манометров* основано на зависимости электрического заряда пьезоэлемента от измеряемого давления. Под действием механической силы на поверхности некоторых кристаллов возникают заряды  $Q = kF$ , зависящие от приложенной силы  $F = S_{\text{эф}} P$ . Заряд  $Q$  подается на вход электронного усилителя и затем на отсчетное устройство. Манометры этого типа применяются для измерения давления в системах с быстропротекающими процессами. Класс точности – 1,5; 2,0.

Принцип действия датчиков Метран основан на использовании *пьезорезистивного эффекта* в гетероэпитаксиальной пленке кремния, выращенной на поверхности монокристаллической пластины из искусственного сапфира. При деформации чувствительного элемента под действием давления или перепада давления изменяется электрическое сопротивление кремниевых резисторов мостовой схемы на поверхности этого чувствительного элемента. Электронное устройство датчика преобразует электрический сигнал от тензопреобразователя в стандартный токовый сигнал (0÷5 мА, 0÷20 мА, 4÷20 мА) или в цифровой сигнал. Также получили распространение проволочные и фольговые тензорезисторы.

В *емкостных манометрах* измеряемое давление воздействует на мембрану, являющуюся подвижным электродом емкостного преобразовательного элемента. При перемещении мембраны изменяется емкость преобразователя, включенного в мост переменного тока. Манометры этого типа применяются для измерения давления в системах с быстропротекающими процессами.

*Ионизационные вакуумметры* с накалимым катодом измеряют давление по количеству ионизированных молекул, поступающих на коллектор и создающих ток, зависящий от давления газа. В *радиоизотопных манометрах* при измерении очень низкого вакуума для ионизации молекул используют  $\alpha$ -излучение, обладающее наивысшей иони-



зационной способностью. В качестве излучателя используют изотопы радия, тория, полония, протактиния и др.

#### 4.4. Защита манометров от вредного воздействия измеряемой среды

Для защиты манометров от агрессивных газов и жидкостей используются разделительные сосуды со специально подобранными разделительными жидкостями, которые не должны смешиваться и взаимодействовать с измеряемой средой, должны быть нейтральными к материалам, из которых изготовлены манометры, соединительные трубки, разделительные сосуды. На рис. 4.9, а изображен разделительный сосуд, применяемый в случаях, когда плотность разделительной жидкости меньше плотности измеряемой жидкости. Разделительные сосуды с

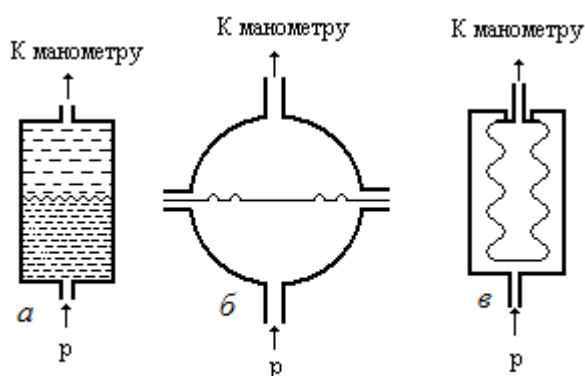


Рис. 4.9. Разделительные сосуды

гибкой мембраной (рис. 4.9, б) применяют для измерения давления жидкостей с механическими примесями. Разделительные сосуды с сифоном (рис. 4.9, в) применяются для защиты манометров от действия агрессивного газа. Широко применяется непрерывная продувка или промывка соединительных трубок дифманометров [7, 14].

### 5. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ВЕЩЕСТВА

Количество вещества измеряется в массовых и объемных единицах. Основной единицей массы является килограмм (кг), а основной единицей объема – кубический метр ( $\text{м}^3$ ).

Количество газа измеряется исключительно в объемных единицах. При этом объем газа приводится к нормальным условиям: температура –  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (293,15 K), давление – 101325 Па (760 мм рт. ст.) и относительная влажность –  $\varphi = 0$ .

**Приборы для измерения количества вещества называют счетчиками.**

**Расходом вещества называют количество вещества, протекающее через данное сечение канала в единицу времени.**

Массовый расход вещества измеряют в килограммах за секунду

(кг/с), а объемный – в кубических метрах за секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

**Приборы для измерения расхода вещества называют расходомерами.**

### 5.1. Измерение количества вещества

Для измерения количества жидкости наибольшее распространение получили скоростные (турбинные) и объемные (камерные) счетчики.

Количество жидкости  $Q$ , протекающей через скоростной счетчик, определяется по числу оборотов турбинки, размещенной в потоке. При этом считается, что частота вращения турбинки пропорциональна средней скорости потока  $n = c v_{\text{ср}}$ . Средняя скорость потока определяется из выражения  $v_{\text{ср}} = Q/S$ , где  $S$  – площадь проходного сечения счетчика.

Тогда  $n = cQ/S$ . Отсюда следует, что частота вращения турбинки связана с объемным расходом жидкости линейной зависимостью.

По конструктивному исполнению **скоростные счетчики** делятся на две группы: крыльчатые (с тангенциальным подводом потока), в которых ось вращения крыльчатки перпендикулярна направлению движения потока, и турбинные (с аксиальным подводом потока), у которых ось вращения параллельна направлению движения потока жидкости. Вращение оси крыльчатки (турбинки) через редуктор и магнитную муфту передается к счетному механизму, по показанию которого определяют количество жидкости, прошедшей через прибор. Скоростные счетчики применяются для измерения количества воды.

Принцип действия **объемных счетчиков** основан на отмеривании объемов измеряемой среды с помощью мерных камер известного объема и суммирования результатов этих измерений.

Наибольшее применение для измерения количества жидкости получили счетчики с овальными шестернями. Две шестерни, находящиеся в зацеплении, вращаются за счет усилия, развиваемого набегающим потоком и создавшегося при этом перепада давления, и за один оборот проталкивают на выход определенный объем жидкости. Ось одной из шестерен вращает счетный механизм. Объемные счетчики применяются для измерения количества различных жидкостей, не содержащих твердых примесей, в том числе нефти и нефтепродуктов.

Для измерения потоков газа используются ротационные счетчики, принцип действия которых аналогичен принципу действия счетчиков с овальными шестернями.

### 5.2. Измерение расхода вещества

Наибольшее применение для измерения расхода вещества в раз-

личных отраслях получили расходомеры переменного перепада давления, расходомеры постоянного перепада давления, расходомеры переменного уровня, электромагнитные расходомеры, вихревые и вихреакустические расходомеры.

Принцип действия расходомеров **переменного перепада давления** основан на изменении потенциальной энергии вещества, протекающего через сужающее устройство, установленное в трубопроводе. Сужающими устройствами служат диафрагмы (рис. 5.1, а), стандартные сопла (рис. 5.1, б), сопла Вентури (рис. 5.1, в) и трубы Вентури (рис. 5.1, г).

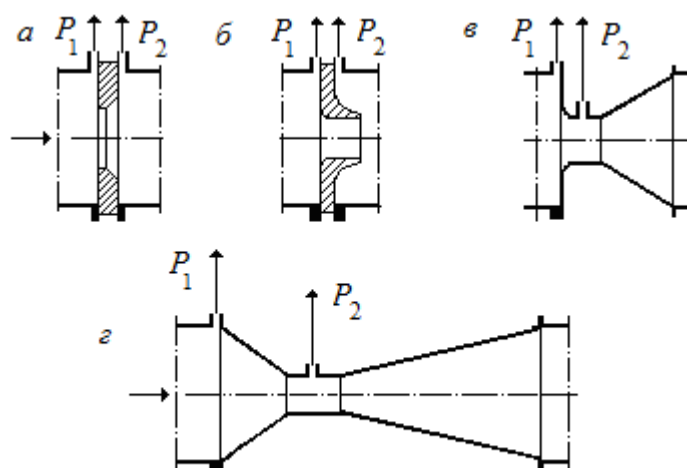


Рис. 5.1. Схемы стандартных сужающих устройств

Поток при протекании через сужающее устройство увеличивает скорость, поэтому на выходе сужающего устройства давление уменьшается. Перепад давления  $P_1 - P_2$  зависит от расхода среды.

Рассмотрим схему потока, протекающего в трубопроводе через диафрагму (рис. 5.2). Выделим в потоке три сечения: *I* – сечение, в котором еще нет влияния сужающего устройства на поток; *II* – сечение, в котором наблюдается наибольшее сужение потока; *III* – сечение, в котором устанавливается постоянное давление  $P_3$ . Диафрагма представляет собой тонкий диск, закрепленный в трубопроводе с помощью фланцев и имеющий круглое концентрическое отверстие, которое со стороны входа имеет острую цилиндрическую кромку, а далее расточено под определенным углом. Материал для изготовления диафрагмы выбирается с учетом свойств контролируемой

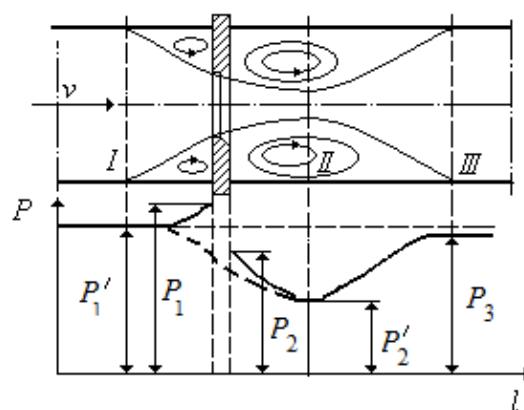


Рис. 5.2. Течение вещества через диафрагму и эпюра давления

среды.

После прохождения сечения  $I$  поток начинает сужаться. Под действием сил инерции поток продолжает сужаться до минимального значения  $S_0$  в сечении  $II$ . После этого поток расширяется до полного сечения трубопровода  $S_1$ . Перед диафрагмой и после диафрагмы наблюдаются зоны с вихревым движением. С увеличением скорости потока давление уменьшается, но из-за подпора давление перед диафрагмой несколько возрастает. Далее давление уменьшается до минимального в сечении  $II$ , а затем возрастает до значения  $P_3$ , не достигая исходного значения. Это связано с потерей энергии на преодоление местного сопротивления.

Для сечений  $I$  и  $II$  запишем уравнение Бернулли (уравнение энергии потока несжимаемой жидкости с плотностью  $\rho$ )

$$P_1' / \rho + k_1 v_1^2 / 2 = P_2' / \rho + k_2 v_2^2 / 2 + \xi v_2^2 / 2, \quad (5.1)$$

где  $P_1' / \rho$  – статический напор, соответствующий потенциальной энергии потока в сечении  $I$ ;  $P_2' / \rho$  – статический напор, соответствующий потенциальной энергии потока в сечении  $II$ ;  $v_1$  и  $v_2$  – средние скорости потока в сечениях  $I$  и  $II$ ;  $k_1$  и  $k_2$  – поправочные коэффициенты на неравномерность распределения скоростей в сечениях  $I$  и  $II$ ;  $v_1^2 / 2$  и  $v_2^2 / 2$  – скоростные напоры, соответствующие кинетическим энергиям потока в сечениях  $I$  и  $II$ ;  $\xi$  – коэффициент сопротивления на участке  $I - II$ ;  $\xi v_2^2 / 2$  – потери кинетической энергии на участке  $I - II$ .

Из условия неразрывности потока имеем

$$v_1 S_1 = v_0 S_0 = v_2 S_2, \quad (5.2)$$

где  $S_1$ ,  $S_0$ ,  $S_2$  – площади поперечного сечения трубопровода, отверстия диафрагмы и наиболее суженного места потока соответственно;  $v_0$  – средняя скорость потока в сечении диафрагмы.

Отношение  $S_0 / S_1 = m$  называется относительной площадью сужающего устройства, а отношение  $S_2 / S_0 = \mu$  – коэффициентом сужения потока. Тогда  $v_1 / v_0 = m$  и  $v_0 / v_2 = \mu$ . Отсюда находим

$$v_1 = m v_0, \quad v_0 = \mu v_2 \text{ и } v_1 = m \mu v_2. \quad (5.3)$$

Подставим значение  $v_1$  из выражения (5.3) в уравнение (5.1), решив его относительно  $v_2$  и получим

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1' - P_2')}. \quad (5.4)$$

Для определения скорости потока  $v_2$  необходимо измерить разность давлений  $P'_1$  и  $P'_2$  в сечениях *I* и *II*. Практически же измеряются давления  $P_1$  и  $P_2$  до и после диафрагмы. Экспериментальные исследования показали, что зависимость между перепадами давления  $(P'_1 - P'_2)$  и  $(P_1 - P_2)$  линейная. Тогда  $P'_1 - P'_2 = \psi (P_1 - P_2)$ . С учетом этой зависимости из выражения (5.4) получим

$$v_2 = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (5.5)$$

Объемный расход ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в сечении *II* определяется выражением  $Q = S_2 v_2$ , а с учетом ранее принятых обозначений  $Q = v_2 \mu S_0$ . Тогда получим

$$Q = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (5.6)$$

Безразмерное выражение  $\alpha = \mu \sqrt{\psi} / \sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}$  принято называть коэффициентом расхода, который учитывает неравномерное распределение скоростей по сечению потока, обусловленное вязкостью жидкости и трением о стенки трубопровода, особенности измерения давления до и после диафрагмы и т. д. Этот коэффициент определяется опытным путем для каждого вида стандартных сужающих устройств.

С учетом принятого обозначения выражение (5.6) для объемного расхода несжимаемой жидкости примет вид

$$Q = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (5.7)$$

Для массового расхода ( $\text{кг}/\text{с}$ ) несжимаемой жидкости имеем

$$G = Q \rho = \alpha S_0 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}. \quad (5.8)$$

При измерении расхода газа и пара учитывается сжимаемость среды путем введения в выражения (5.7) и (5.8) поправочного множителя  $\varepsilon$ , называемого коэффициентом расширения:

$$Q = \alpha \varepsilon S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}; \quad (5.9)$$

$$G = \alpha \varepsilon S_0 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}. \quad (5.10)$$

Другие стандартные сужающие устройства (см. рис. 5.1) формируют протекающий через них поток среды так, что потери давления на

них меньше, чем для диафрагмы.

Стандартные сужающие устройства применяются без индивидуальной градуировки, поэтому они поставляются в комплекте с вторичными приборами, отградуированными с учетом типа сужающего устройства. Перепад давления на сужающем устройстве измеряется с помощью дифманометра со встроенной системой передачи показаний на расстояние.

В зависимости от условий пожаро- и взрывоопасности измерительные комплекты имеют различную структуру.

Для пожаро- и взрывобезопасных условий производства измерительный комплект содержит сужающее устройство СУ, дифференциальный манометр ПП с электрической системой передачи показаний Пр (дифференциально-трансформаторная или токовая) и прибор вторичный ПВ (рис. 5.3).

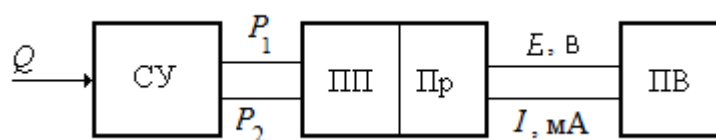


Рис. 5.3. Измерительный комплект измерения расхода для пожаро- и взрывобезопасных условий

Для пожаро- и взрывоопасных условий измерительный комплект содержит сужающее устройство СУ, дифференциальный манометр ПП с пневматической системой передачи показаний (Пр) и прибор вторичный ПВ (рис. 5.4).

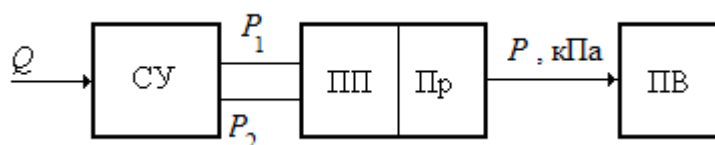


Рис. 5.4. Измерительный комплект измерения расхода для пожаро- и взрывоопасных условий

Так как выражения (5.7) и (5.8) устанавливают нелинейную зависимость между расходом среды и перепадом давления на стандартном сужающем устройстве, то шкала вторичного прибора будет неравномерная. Чтобы шкалу сделать равномерной, перед подачей пневматического сигнала на вход прибора вторичного его пропускают через прибор извлечения квадратного корня (рис. 5.5).

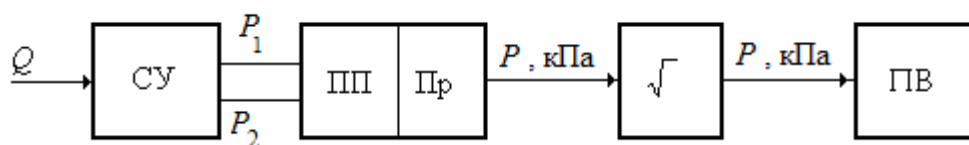


Рис. 5.5. Измерительный комплект измерения расхода с прибором извлечения квадратного корня пневматическим

Аналогичный комплекс можно создать для измерения расхода на базе электронных приборов (рис. 5.6).

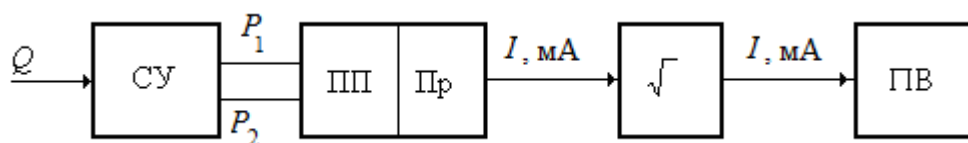


Рис. 5.6. Измерительный комплект измерения расхода с блоком вычислительных операций электронным

Принцип действия **расходомеров постоянного перепада давления** (расходомеры обтекания) основан на зависимости перемещения обтекаемого тела (поплавка) в вертикальном канале от расхода измеряемой среды. Наибольшее распространение получили ротаметры и поплавковые расходомеры. На поплавок, размещенный в конической трубе, снизу действует выталкивающая сила потока жидкости или газа (см. рис. 5.7). Под действием этой силы поплавок поднимается, увеличивается сечение кольцевой щели между поплавком и стенкой трубы до тех пор, пока не уравновесятся силы, действующие на поплавок. Сверху вниз на поплавок действует сила тяжести  $G_{\Pi} = V \rho_{\Pi} g$ , где  $V$  – объем по-

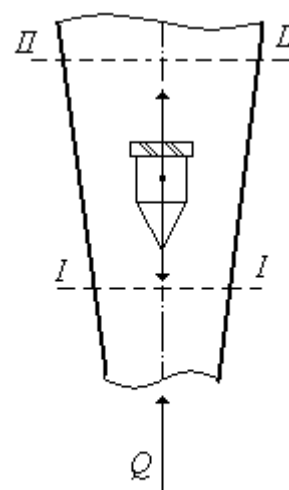


Рис. 5.7. Схема ротаметра

плавка;  $\rho_{\Pi}$  – плотность материала поплавка;  $g$  – ускорение свободного падения, и сила давления потока на верхнюю плоскость поплавка  $F_2 = P_2' S$ , где  $P_2'$  – среднее давление потока на единицу площади верхней поверхности поплавка;

$S$  – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка. Снизу вверх на поплавок действует давление потока  $F_1 = P_1' S$ , где  $P_1'$  – среднее давление потока на единицу площади нижней поверхности поплавка, и сила трения потока о поверхность поплавка  $F_{\Pi} = k v_{\kappa}^n S_{\phi}$ , где  $k$  – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса;  $v_{\kappa}$  – средняя скорость потока в кольцевом канале;  $S_{\phi}$  – площадь боковой поверхности поплавка;  $n$  – показатель, зависящий от скорости потока.

Состояние равновесия наступает тогда, когда выполняется равенство

$$G_{\Pi} + F_2 = F_1 + F_{\Pi}.$$

Отсюда имеем

$$P_1' - P_2' = V \rho_{\Pi} g / S - k v_{\kappa}^n S_{\phi} / S. \quad (5.11)$$

Архимедова сила в этом уравнении учтена в разности давлений. Если принять, что скорость потока в кольцевом сечении при изменении расхода не меняется, то правая часть уравнения (5.11) будет постоянной, и в состоянии равновесия  $P'_1 - P'_2 = \text{const}$ , **поэтому приборы данного типа носят название расходомеров постоянного перепада давления.**

При увеличении расхода измеряемой среды увеличится сила трения за счет увеличения скорости потока в кольцевом сечении, поплавков будет подниматься, площадь кольцевого сечения будет увеличиваться, скорость  $v_k$  уменьшится, сила трения тоже будет уменьшаться до состояния равновесия, определяемого уравнением (5.11). Поплавок будет находиться на определенном уровне.

Используя условия неразрывности струи и уравнение Бернулли для сечений *I* и *II*, можно получить уравнение [7, 14]

$$Q = \alpha S_k \sqrt{\frac{2gV(\rho_{\text{п}} - \rho)}{\rho S}}, \quad (5.12)$$

где  $S_k$  – площадь кольцевого отверстия, образованного конусной трубкой и верхней частью поплавка.

Если принять величины под корнем в уравнении (5.12) постоянными, то

$$Q = \alpha S_k k. \quad (5.13)$$

Отсюда следует, что связь между расходом  $Q$  и площадью кольцевого сечения  $S_k$  линейная и шкала ротаметра будет равномерная. Так как площадь  $S_k$  функционально связана с положением поплавка, то расход среды определяется по высоте подъема поплавка.

У **стеклянных ротаметров** шкала 0÷100 % нанесена на внешней поверхности стеклянной конической трубки, закрепляемой с помощью фланцев на вертикальном участке трубопровода. Внутри помещается поплавок с нанесенными косыми насечками, обеспечивающими устойчивое вращение поплавка в центре потока. Стеклометрические ротаметры используются для измерения расхода прозрачных жидкостей и газов, обладают высокой надежностью, широким диапазоном измерения и могут применяться для измерения малых расходов.

**Поплавковые расходомеры** имеют цилиндрический металлический корпус 1, внутри которого конический поплавок 2 перемещается относительно кольцевой диафрагмы 3. Перемещение поплавка с помощью штока 4 передается на сердечник дифференциального трансформатора датчика 5 (см. рис. 5.8) или с помощью кинематической схемы – на вход в пневматический преобразователь перемещения или на вход в



преобразователь перемещения в унифицированный электрический сигнал. Применяются для измерения расхода газов и жидкостей в технологических трубопроводах. Класс точности – 2,5.

Измерительный комплект для измерения расхода содержит поплавковый расходомер ПП со встроенным дифференциально-трансформаторным датчиком (Пр) и прибор вторичный (см. рис. 5.9, а). Прибор вторичный поставляется в комплекте с расходомером. Если в расходомер встроен преобразователь перемещения в унифицированный токовый сигнал, то состав измерительного комплекта аналогичен предыдущему, только прибор вторичный измеряет унифицированный токовый сигнал  $I$ , мА (см. рис. 5.9, а). Если в расходомер встроен преобразователь сигнала перемещения в пневматический сигнал, то прибор вторичный измеряет пневматический сигнал  $20 \div 100$  кПа (см. рис. 5.9, б).

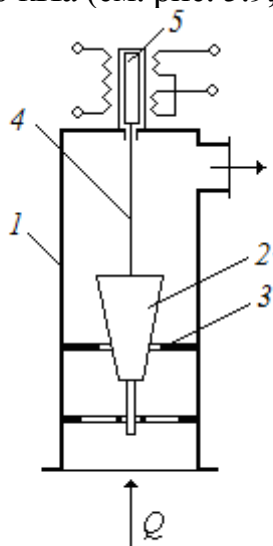


Рис. 5.8. Схема расходомера обтекания

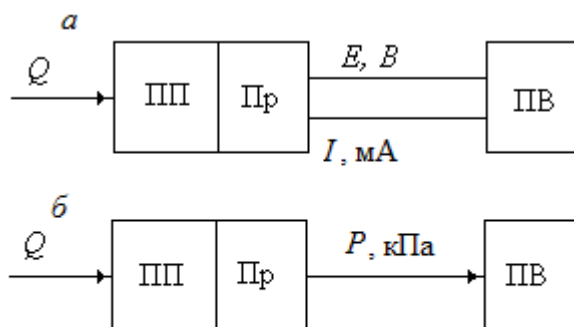


Рис. 5.9. Измерительный комплект с расходомером обтекания

**Электромагнитные расходомеры** применяются для измерения расхода электропроводящих жидкостей и пульп. Принцип действия их основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, в соответствии

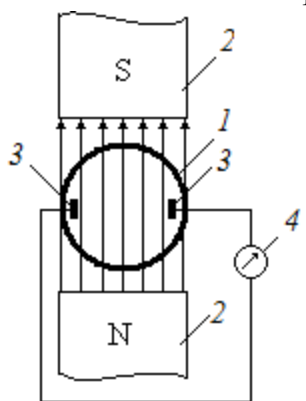


Рис. 5.10. Схема электромагнитного расходомера

с которым в проводнике, пересекающем внешнее магнитное поле, индуцируется ЭДС. Структурно электромагнитный расходомер состоит из первичного преобразователя и измерительного устройства или передающего преобразователя (рис. 5.10). Первичный преобразователь состоит из изолированного изнутри участка трубы 1, изготовленного из немагнитного материала и размещенного между полюсами постоянного магнита 2. Протекающая по

трубе жидкость пересекает магнитные силовые линии, в результате чего в жидкости индуцируется ЭДС, пропорциональная средней скорости движения потока, а следовательно и объемному расходу жидкости:

$$E = Bdv_{\text{ср}}, \quad (5.14)$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость движения потока.

Выразив среднюю скорость потока через объемный расход  $v_{\text{ср}} = 4Q/\pi d^2$ , получим

$$E = (4B/\pi d)Q = kQ. \quad (5.15)$$

Индуктируемая ЭДС снимается электродами 3 и измеряется вторичным прибором 4 с равномерной шкалой.

Использование постоянного магнитного поля приводит к появлению на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации, вносящих погрешность в измерение ЭДС, индуцируемой в движущейся жидкости. Имеются и другие недостатки, поэтому в электромагнитных расходомерах применяют переменное магнитное поле. Тогда индуцируемая ЭДС связана с расходом жидкости выражением

$$E = (4B_{\text{max}}/\pi d) Q \sin \omega t, \quad (5.16)$$

где  $B_{\text{max}}$  – амплитудное значение магнитной индукции;  $\omega$  – частота переменного тока.

Передающий преобразователь убирает помехи, накладывающиеся на полезный сигнал, и преобразует сигнал измерения в унифицированный выходной сигнал постоянного тока.

Измерительный комплект содержит первичный измерительный преобразователь ПП, передающий преобразователь щитового монтажа ППр и прибор вторичный ПВ (рис. 5.11).

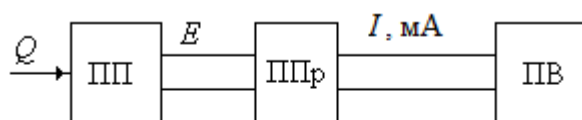


Рис. 5.11. Измерительный комплект электромагнитного расходомера

**Вихреакустические преобразователи расхода** предназначены для измерения объемного расхода и объема водопроводной, теплофикационной и технической воды, водных растворов, пластовых вод. Суть вихреакустического принципа измерения расхода состоит в измерении скорости потока путем определения частоты образования вихрей за те-

лом обтекания, установленным в проточной части преобразователя расхода (см. рис. 5.12). В корпусе проточной части расположено тело обтекания в виде призмы трапецеидального сечения 1, пьезоизлучатель 2, пьезоприемник 3 и термодатчик 7. Электронный блок преобразователя включает в себя генератор 4, фазовый детектор 5 и микропроцессорный адаптивный фильтр с блоком формирования выходных сигналов 6. От генератора 4 на пьезоизлучатель 2 подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. При прохождении через поток (в результате взаимодействия с вихрями) ультразвуковые колебания модулируются по фазе. На пьезоприемнике 3 модулированные ультразвуковые колебания преобразуются в напряжение, которое подается на фазовый детектор 6, где определяется разность фаз между сигналами с пьезоприемника и опорного генератора. Выходное напряжение фазового детектора по частоте и амплитуде соответствует частоте и интенсивности следования вихрей, которая, в силу пропорциональности скорости потока, является мерой расхода. Расход рассчитывается по программе, размещенной в микропроцессоре. Термодатчик 7 измеряет температуру потока с целью введения температурной коррекции, предусмотренной программой вычисления расхода. Выходной сигнал – унифицированный токовый. Измерительный комплект вихреакустического расходомера состоит из преобразователя вихреакустического ПВА с электронным блоком ЭБ и прибора вторичного (рис. 5.13).

***Вихревые расходомеры*** измеряют расход по частоте образования вихрей за телом обтекания, где установлены два пьезоэлектрических преобразователя пульсации давления. Частота пульсации давления идентична частоте вихреобразования и служит мерой расхода. Электронный блок представляет собой плату цифровой обработки, содержащую два микропроцессора, где производится обработка сигналов первичных преобразователей пульсаций давления и расчет объемного расхода, массового расхода, объема, тепловой энергии и т. д. Выходной сигнал токовый –  $4 \div 20$  мА. Структура измерительного комплекта аналогична структуре вихреакустического расходомера (рис. 5.13).

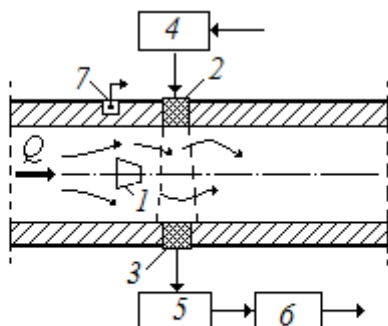


Рис. 5.12. Схема вихреакустического расходомера

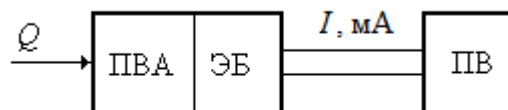


Рис. 5.13. Измерительный комплект вихреакустического расходомера

**Тепловые (калориметрические) расходомеры** измеряют расход вещества по разности температур до и после нагревателя (см. рис. 5.14). В трубопроводе 1 установлены два термопреобразователя 2 и 3 для измерения температуры потока, а между ними установлен нагреватель 4. Для неподвижной среды разность температур равна нулю. При малом расходе вещества температура потока  $t_1$ , измеряемая термопреобразователем 2, падает в результате теплообмена с холодным потоком, а температура потока  $t_2$ , измеряемая термопреобразователем 3, увеличивается в результате теплообмена с нагретым потоком. С увеличением расхода вещества разность температур  $\Delta t = t_1 - t_2$  также увеличивается. Зависимость массового расхода от разности температур может быть найдена из уравнения теплового баланса  $G = N / (k c_p \Delta t)$ , где  $N$  – мощность нагревателя;  $c_p$  – теплоемкость вещества;  $k$  – поправочный коэффициент. Связь – линейная.

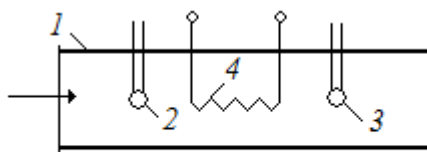


Рис. 5.14. Схема теплового расходомера

## 6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

**Приборы для измерения уровня жидкостей или сыпучих материалов носят общее название уровнемеры.** Основная единица измерения уровня – метр. Уровнемеры применяются для определения количества жидкости в резервуаре и делятся на уровнемеры широкого диапазона (пределы измерения  $0,5 \div 20$  м) и уровнемеры узкого диапазона (пределы измерения  $0 \div \pm 450$  мм); обеспечивают возможность визуального отсчета и передачи измеряемой величины на вторичный прибор. Наиболее широкое распространение получили уровнемеры поплавковые, гидростатические, электрические, акустические и ультразвуковые.

### 6.1. Поплавковые уровнемеры

**Поплавковые уровнемеры** делятся на приборы с **плавающим поплавком** и с **частично погруженным поплавком**. В первом случае поплавок плавает на поверхности жидкости и его перемещение с помощью гибкого троса передается на отсчетное устройство (рис. 6.1, а). **Это уровнемер широкого диапазона.** Недостатки: обратная шкала; погрешность из-за силы, натягивающей трос; трудность выполнения отсчета показаний. Второй вариант, когда перемещение поплавка с помощью штанги передается на отсчетное устройство (рис. 6.1, б). **Это уровнемер узкого диапазона.**

**Действие уровнемеров с частично погруженным поплавком (буйковые уровнемеры)** основано на компенсации выталкивающей силы, действующей на неподвижно закрепленный поплавок при изменении уровня жидкости, с использованием пневматических преобразователей типа «сила – давление» (см. рис. 6.2) и электрических – типа «сила – ток».

При постоянном значении уровня жидкости  $h$  сумма моментов сил (см. рис. 6.2), действующих на рычаг 2, равна нулю:

$$M_1 + M_2 - M_3 - M_4 = 0, \quad (6.1)$$

где  $M_1 = F l_1 = (G - \pi d^2 \rho_{\text{ж}} g h / 4) l_1$  – момент силы  $F$ , равный разности веса поплавка  $G$  и выталкивающей (Архимедовой) силы, действующей на поплавок  $l$ ;  $d$  – диаметр поплавка;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;

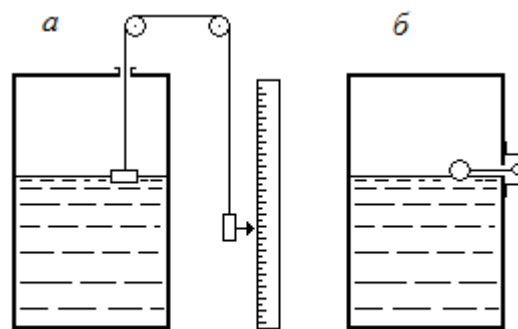


Рис. 6.1. Схемы поплавковых уровнемеров

$M_2 = F_{ос} l_2 = S_{эф} P_{вых} l_2$  – момент силы обратной связи, развиваемой доннышком сиффона 7 под действием давления  $P_{вых}$ ;  $S_{эф}$  – эффективная площадь доннышка сиффона;  $M_3 = N l_3$  – момент, развиваемый противовесом 3;  $M_4 = \delta_{пр} \Delta l l_4$  – момент силы, развиваемой пружиной 6 корректора.

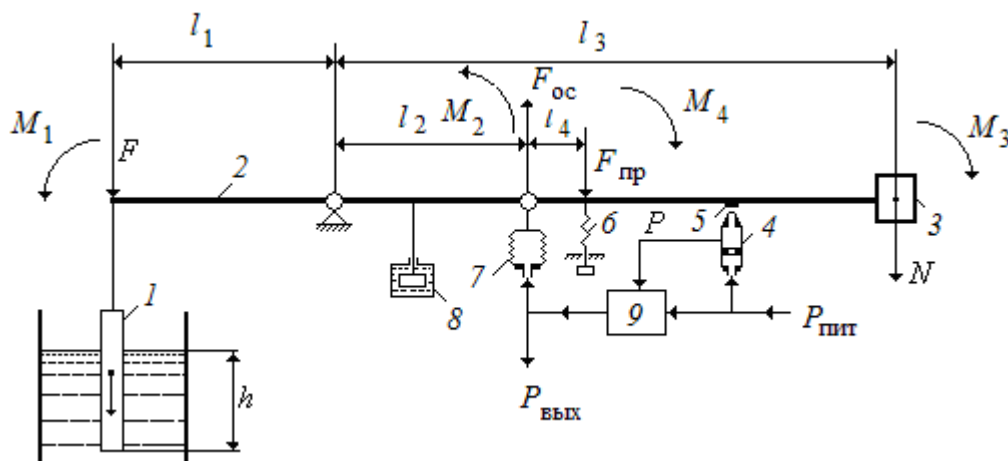


Рис. 6.2. Схема буйкового пневматического уровнемера

Подставляя в (6.1) выражения для моментов сил, получим

$$G l_1 - \pi d^2 \rho_{ж} g h l_1 / 4 + S_{эф} P_{вых} l_2 - N l_3 - \delta_{пр} \Delta l l_4 = 0. \quad (6.2)$$

Вес  $N$  противовеса рассчитывается из условия равенства моментов

$$G l_1 = N l_3, \quad N = G l_1 / l_3. \quad (6.3)$$

Тогда из равенства (6.2), с учетом (6.3), получим

$$P_{вых} = \pi \frac{d^2 \rho_{ж} g l_1}{4 S_{эф} l_2} h + \frac{\delta_{пр} l_4}{S_{эф} l_2} \Delta l. \quad (6.4)$$

В соответствии с требованиями ГСП при  $h = 0$  выходное давление  $P_{вых}$  должно равняться 20 кПа. Начальное давление  $P_{вых,0} = 20$  кПа устанавливается за счет изменения степени натяжения пружины 6 корректора путем установки стрелки вторичного прибора на начальную отметку шкалы. Тогда уравнение (6.4) можно записать в виде

$$P_{вых} = k h + 20, \quad (6.5)$$

где  $k = \pi \frac{d^2 \rho_{ж} g l_1}{4 S_{эф} l_2}$  – коэффициент передачи уровнемера.

Между выходным давлением  $P_{вых}$  и измеряемым уровнем жидкости в состоянии равновесия имеет место линейная зависимость. Шкала

вторичного прибора должна быть равномерная.

Демпфер 8 предназначен для предотвращения автоколебаний в измерительной системе уровнемера.

При повышении уровня  $h$  увеличивается выталкивающая сила, действующая на поплавок. Рычаг 2 поворачивается по часовой стрелке, что вызывает приближение заслонки 4 к соплу 5. Увеличивается давление воздуха внутри сопла  $P$ , которое после усиления по мощности в усилителе 9 поступает на сильфон обратной связи 7 и на выход. Повышение выходного давления  $P_{\text{вых}}$  приводит к увеличению компенсирующего усилия  $F_{\text{ос}}$ , развивающегося на доннышке сильфона, до состояния равновесия, при котором выполняется условие (6.1). Класс точности – 1,0 и 1,5.

Измерительный комплект состоит из первичного буйкового преобразователя уровня ПП со встроенным пневматическим преобразователем ППр и прибора вторичного ПВ (рис. 6.3).

Уровнемер буйковый электрический с преобразователем типа «сила – ток» имеет первичный преобразователь уровня в усилие, аналогичный рассмотренному выше. Усилие с помощью передаточного механизма воздействует на электросиловой преобразователь, на выходе которого изменяется унифицированный токовый сигнал.

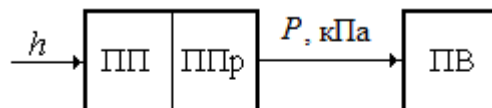


Рис. 6.3. Измерительный комплект буйкового уровнемера пневматического

Измерительный комплект состоит из первичного буйкового преобразователя уровня ПП со встроенным электросиловым преобразователем ЭПр и прибора вторичного ПВ (рис. 6.4).

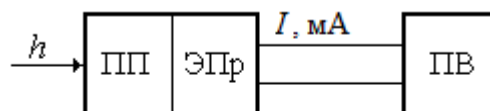


Рис. 6.4. Измерительный комплект буйкового уровнемера электрического

## 6.2. Гидростатические уровнемеры

**Гидростатические уровнемеры** измеряют уровень среды по гидростатическому давлению столба жидкости:

$$P = \rho gh. \quad (6.6)$$

Гидростатическое давление столба жидкости можно измерить манометрами и дифференциальными манометрами, шкала которых градуирована в единицах измерения уровня. Манометр 2 можно установить на нижнем уровне (рис. 6.5, а) жидкости в сосуде 1. Гидростатическое давление можно измерить по давлению воздуха в замкнутом про-

пространстве, образованном эластичной мембраной 3, установленной в нижней части сосуда 1, и манометром 2 (рис. 6.5, б). Из этих примеров уже можно сделать вывод, что манометрами целесообразно измерять уровень в сосудах, находящихся под атмосферным давлением (открытые сосуды). Для измерения уровня жидкости в технологических аппаратах, находящихся под давлением, можно использовать дифференциальные манометры (рис. 6.5, в). Уравнительный сосуд 2 устанавливают на высоте, соответствующей максимальному значению уровня, и соединяют пространства над уровнем жидкости в аппарате 1 и в уравнительном сосуде 2, заполненном измеряемой средой. Главное назначение уравнительного сосуда заключается в обеспечении постоянного столба жидкости в одном из колен дифманометра. Тогда давление в правом колене дифманометра будет равно

$$P_2 = (h_0 + h_{\max})\rho g + P, \quad (6.7)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $P$  – давление в аппарате.

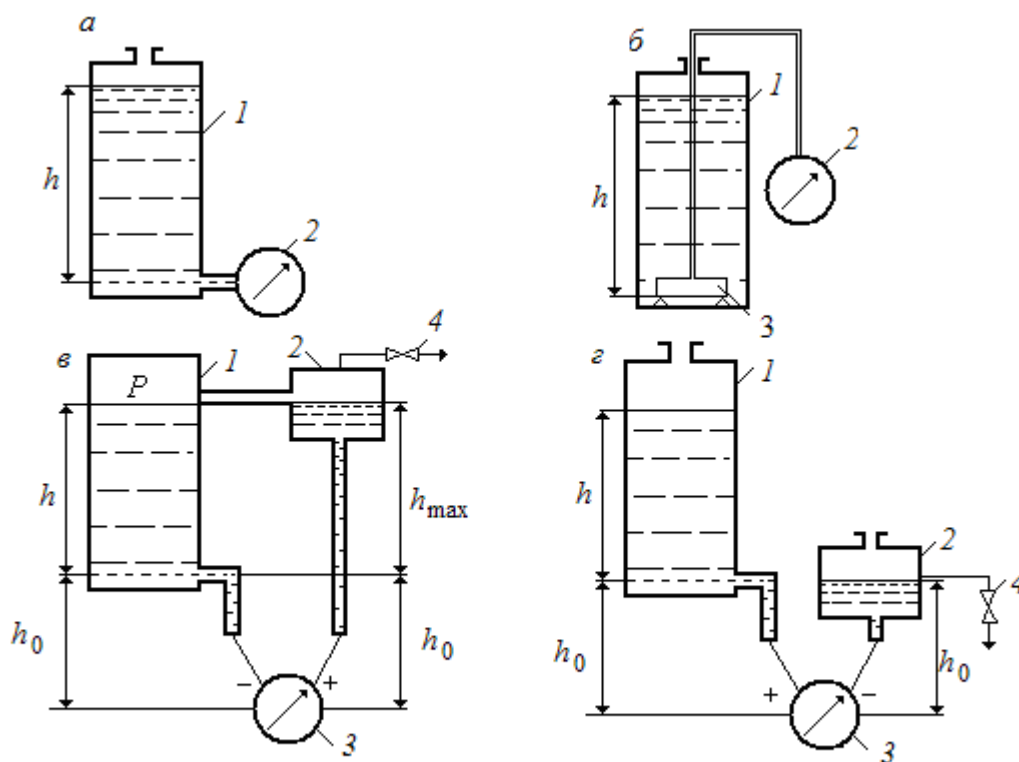


Рис. 6.5. Схемы измерения уровня гидростатическими уровнемерами

Давление в левом колене дифманометра определится равенством

$$P_1 = (h_0 + h)\rho g + P. \quad (6.8)$$

Разность давлений, измеряемая дифференциальным манометром,



определяется по выражению

$$\Delta P = P_2 - P_1 = h_{\max} \rho g - h \rho g = a - kh. \quad (6.9)$$

Из выражения (6.9) следует, что шкала уровнемера будет равномерной и обращенной. При  $h = h_{\max}$  разность давлений  $\Delta P = 0$ ; при  $h = 0$  разность давлений  $\Delta P = \Delta P_{\max}$ .

Измерение уровня в открытых сосудах с помощью дифманометра (см. рис. 6.5, *з*) отличается от предыдущего примера тем, что уравнивательный сосуд устанавливается по высоте на уровне дна аппарата. Тогда

$$P_1 = (h + h_0) \rho g; \quad (6.10)$$

$$P_2 = h_0 \rho g; \quad (6.11)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h = kh. \quad (6.12)$$

Из выражения (6.12) следует, что шкала уровнемера будет равномерная. Вентиль 4 служит для поддержания постоянного уровня жидкости в уравнительном сосуде. Измерительные комплекты для измерения уровня с помощью манометров и дифференциальных манометров будут содержать первичные преобразователи ПП со встроенными передающими преобразователями ПП<sub>р</sub> типа «перемещение – давление» (рис. 6.6, *а*) или «перемещение – ток» (рис. 6.6, *б*).

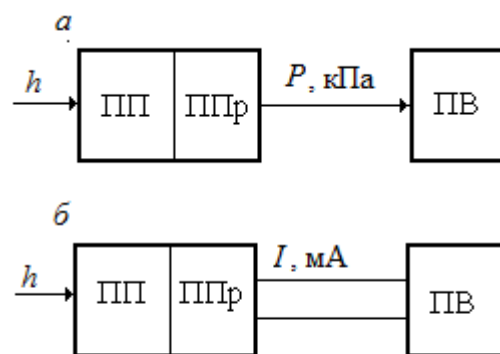


Рис. 6.6. Измерительные комплекты гидростатических уровнемеров

### 6.3. Пьезометрические уровнемеры

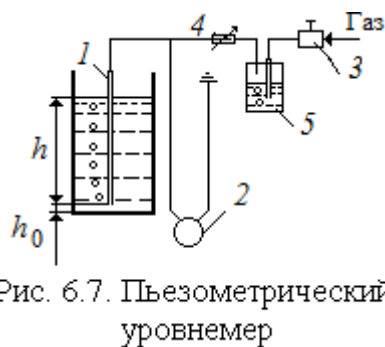


Рис. 6.7. Пьезометрический уровнемер

**Пьезометрические уровнемеры** измеряют уровень по давлению газа, прокачиваемого через слой жидкости высотой  $h$ . Это давление равно гидростатическому давлению столба жидкости (6.6) и, следовательно, пропорционально уровню при постоянном расходе газа. Давление газа измеряется (см. рис. 6.7) манометром 2. Для поддержания постоянного расхода газа через пьезометрическую трубку 1 устанавливается стабилизатор расхода 3. Газ прокачивается через стаканчик 5, предназначенный для оценки расхода газа по

числу пузырьков, пробулькивающих через слой жидкости в единицу времени, и через постоянный дроссель 4 поступает в пьезометрическую трубку 1. В этом случае давление газа в пьезометрической трубке будет зависеть от уровня жидкости  $h$  в сосуде (6.6) и газ будет выходить из нижнего конца пьезометрической трубки в виде пузырьков.

Измерительный комплект пьезометрического уровнемера содержит первичный преобразователь ПП, дифференциальный манометр ДМ с преобразователями типа «перемещение – давление» (рис. 6.8, а) или «перемещение – ток» (рис. 6.8, б).

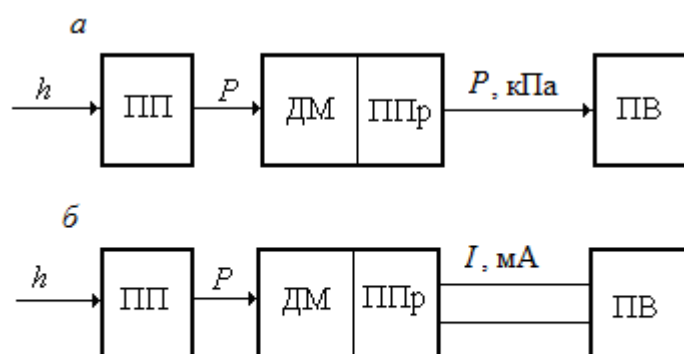


Рис. 6.8. Измерительный комплект пьезометрического уровнемера

## 6.4. Электрические уровнемеры

**Электрические уровнемеры** применяются для измерения уровня электропроводных и неэлектропроводных жидкостей, а также агрессивных и взрывоопасных жидкостей. По виду чувствительного элемента, преобразующего значение уровня в электрический сигнал, электрические уровнемеры делятся на емкостные и кондуктометрические. В емкостных уровнемерах используется зависимость электрической емкости чувствительного элемента от уровня жидкости. Измерительный комплект емкостного уровнемера состоит из первичного (емкостного) преобразователя ПП, передающего преобразователя ППр, формирующего

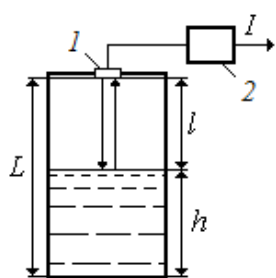


Рис. 6.9. Схема акустического (радарного) уровнемера

унифицированный сигнал постоянного тока, и прибора вторичного (см. рис. 6.6, б). Кондуктометрические уровнемеры обычно используют для сигнализации уровня электропроводящих сред и сыпучих материалов. При достижении заданного уровня измеряемая среда замыкает электрическую цепь между электродом и корпусом аппарата. При этом срабатывает реле, выходной сигнал которого направляется в схему сигнализации.

## 6.5. Акустические уровнемеры

**Акустические (радарные)** уровнемеры используют принцип локации. Акустический сигнал от источника  $I$  достигает поверхности раздела фаз, частично отражается от нее и воспринимается приемником  $I$  (рис. 6.9). Время прохождения акустического сигнала

$$\tau = 2l/v, \quad (6.13)$$

где  $v$  – скорость распространения звука в газовой среде. Определив  $l = L - h$ , получим

$$h = L - \frac{v}{2}\tau = a - k\tau. \quad (6.14)$$

Между уровнем жидкости и временем прохождения акустического сигнала имеет место линейная зависимость. В передающем преобразователе 2 замеряется время  $\tau$ , рассчитывается значение уровня и преобразуется в унифицированный токовый сигнал  $I$ . Шкала вторичного прибора будет равномерная.

Акустические (радарные) уровнемеры могут использоваться для измерения уровня жидкости в резервуарах и емкостях любого типа и размеров. Они просты в обслуживании, имеют малую погрешность измерения ( $\pm 5$  мм).

Акустические уровнемеры для измерения уровня сыпучих сред аналогичны акустическим уровнемерам для жидких сред. Контролируемая среда – гранулы диаметром  $2 \div 200$  мм. Классы точности – 1,0; 1,5.

Принцип действия **ультразвуковых уровнемеров** основан на отражении ультразвуковых колебаний от границы раздела двух фаз со стороны жидкости. Время прохождения ультразвуковых колебаний от источника до границы раздела фаз и обратно до приемника  $\tau = 2h/v$ , где  $v$  – скорость распространения

звука в измеряемой среде, или  $h = \frac{v}{2}\tau = k\tau$ .

Между уровнем и временем прохождения сигнала имеет место прямая линейная зависимость. В передающем преобразователе замеряется время  $\tau$ , рассчитывается значение уровня и преобразуется в унифицированный токовый сигнал  $I$ . Шкала вторичного прибора будет линейная.

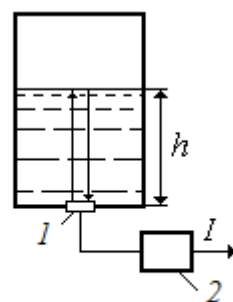


Рис. 6.10. Схема ультразвукового уровнемера

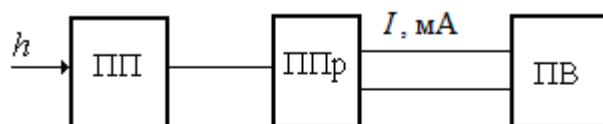


Рис. 6.11. Измерительный комплект  
акустического и ультразвукового  
уровнемеров

Измерительный комплект акустического и ультразвукового уровнемеров состоит из первичного преобразователя ПП, монтируемого на сосудах, промежуточного преобразователя ППр, формирующего измерительный унифицированный сигнал постоянного тока, и вторичного прибора.

## 7. КОНТРОЛЬ СОСТАВА И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Задача анализа может быть связана с задачей определения содержания одного какого-либо компонента смеси либо двух и более компонентов смеси.

Задача автоматизированного контроля состава вещества в химико-технологических процессах наиболее часто сводится к измерению концентрации определяемого компонента в бинарных и псевдобинарных смесях жидкостей и газов.

Большое многообразие анализируемых компонентов и еще большее многообразие их смесей, находящихся в самых различных условиях, определяют большое разнообразие номенклатуры аналитических приборов.

Приборы для анализа состава и свойств вещества в химико-технологических процессах принято называть *анализаторами*.

Если анализатор предназначен только для определения одного компонента в смеси, то его часто называют *концентратором*.

Анализаторы, предназначенные для анализа состава газовых смесей, называют *газоанализаторами*.

Анализаторы делятся на лабораторные (неавтоматические) и промышленные (автоматические). Автоматические анализаторы все операции по определению состава и качества вещества выполняют в автоматическом режиме без участия человека. Кроме того, анализаторы бывают непрерывного действия, когда анализ осуществляется непрерывно, и циклического действия, когда анализ осуществляется с определенной циклическостью.

Для определения состава и свойств вещества в настоящее время применяют косвенные методы анализа: физические, физико-химические и химические.

Косвенные методы анализа – это такие методы анализа, при которых для определения искомого параметра используется его известная взаимосвязь с каким-либо физическим или физико-химическим свойством определяемого компонента.

В данном пособии рассматриваются принципиальные схемы анализаторов, получающих в непрерывном режиме информацию, необходимую для управления химико-технологическими процессами.

## 7.1. Термохимические газоанализаторы

Принцип действия термохимических газоанализаторов основан на использовании теплового эффекта химической реакции, протекающей между определяемым компонентом анализируемой среды и вспомогательным реагентом, либо на использовании теплового эффекта каталитического окисления горючих газов в присутствии катализатора. Сигналом измерительной информации служит температура, значение которой зависит от теплового эффекта химической реакции.

Анализируемый газ прокачивается через камеру 1 (см. рис. 7.1), где размещены измерительный 2 и сравнительный 3 чувствительные элементы. Чувствительный элемент 2 представляет собой платиновую проволоку с активированной поверхностью или пеллисторы, у которых платиновая проволока помещена в шарик или цилиндр, а поверхности их покрыты слоем платино-палладиевого катализатора. Сравнительный чувствительный элемент закрыт колпачком. Он включен в плечо неуравновешенного моста 4 и служит для устранения влияния изменения температуры окружающей среды. Горючий компонент газовой смеси окисляется на поверхности измерительного чувствительного элемента с выделением тепла. В результате увеличивается температура и сопротивление платиновой нити, включенной в плечо неуравновешенного моста 4, что приводит к изменению напряжения в измерительной диагонали  $\Delta U$ , измеряемого вторичным прибором 5. Зависимость между этим напряжением и объемной концентрацией горючего определяемого компонента  $c$  линейная:

$$\Delta U = kc, \quad (7.1)$$

поэтому шкала прибора равномерная. Рассмотренный тип прибора широко используется в качестве сигнализатора взрывоопасных концентраций горючих газов и паров в воздухе промышленных помещений.

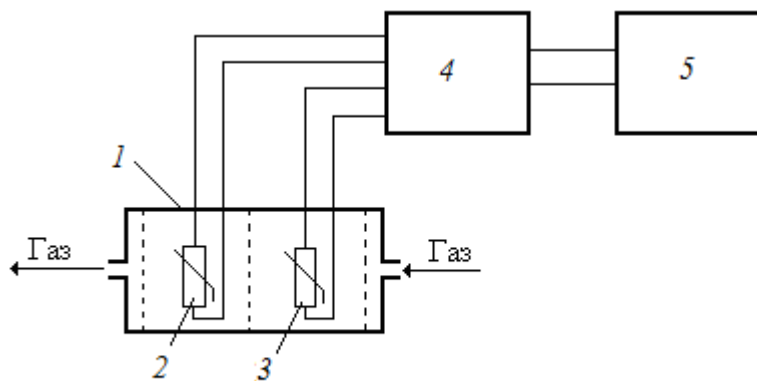


Рис. 7.1. Схема термохимического газоанализатора

Для измерения малых концентраций горючих компонентов в газо-

вой смеси используются термохимические газоанализаторы с насыпным катализатором, помещенным в ячейку с термометром сопротивления 2, а ячейка с термометром сопротивления 3 заполнена инертным материалом (см. рис. 7.1). Класс точности – 5,0.

## 7.2. Термокондуктометрические газоанализаторы

В термокондуктометрических газоанализаторах используется зависимость электрического сопротивления проводника с большим температурным коэффициентом сопротивления от теплопроводности анализируемой газовой смеси, определяемой содержанием измеряемого компонента. Теплопроводность определяемого компонента должна так отличаться от теплопроводности остальных компонентов смеси, что его концентрация определяет теплопроводность смеси. Такими компонентами служат водород, двуокись углерода, метан, гелий, аргон, двуокись серы, аммиак в псевдобинарных смесях. Для создания термокондуктометрических газоанализаторов используются прямые и дифференциальные измерительные газовые схемы.

Наиболее эффективно сравнивать теплопроводность анализируемой газовой смеси с теплопроводностью сравнительного газа. Анализируемый газ с постоянной скоростью прокачивается через камеры детектора, в которых размещены терморезисторы  $R_1$  и  $R_3$ , изготовленные из платиновой, вольфрамовой или вольфрамрениевой проволоки (рис. 7.2). Сравнительный газ прокачивается через камеры, в которых размещены терморезисторы  $R_2$  и  $R_4$ . Все терморезисторы

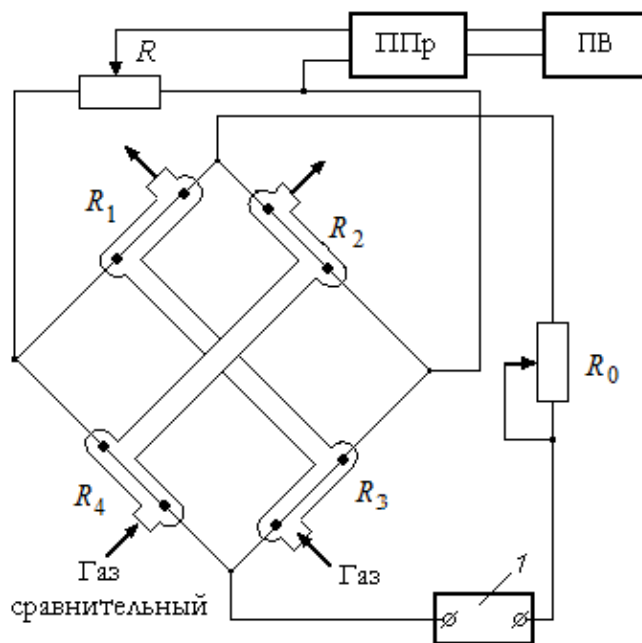


Рис. 7.2. Схема термокондуктометрического газоанализатора

включены в плечи неуравновешенного моста, для питания которого используется источник стабилизированного питания постоянного тока  $I$ . Напряжение питания устанавливается с помощью сопротивления  $R_0$  таким, чтобы терморезисторы были нагреты до заданной температуры ( $50 \div 200$  °C). Тепловая энергия от терморезисторов за счет теплопроводности передается к стенкам камер. При изменении концентрации определяемого компонента в газовой смеси изменится теплопровод-

ность смеси и температура терморезисторов  $R_1$  и  $R_3$ , а температура терморезисторов  $R_2$  и  $R_4$  будет оставаться постоянной. В результате в измерительной диагонали неуравновешенного моста изменится напряжение, часть которого снимается с сопротивления  $R$  и поступает в промежуточный преобразователь ППр, где формируется унифицированный сигнал, измеряемый автоматическим потенциометром ПВ. Напряжение небаланса будет зависеть от разности теплопроводности анализируемой и сравнительной газовой смеси. Класс точности –  $2,5 \div 10$ . Газоанализаторы поставляются в комплекте с прибором вторичным и имеют выходные сигналы  $0 \div 5$  мА,  $0 \div 10$  В.

### 7.3. Термомагнитные газоанализаторы

Действие термомагнитных газоанализаторов основано на использовании парамагнитных свойств молекул кислорода, заключающееся во взаимодействии молекул с магнитным полем постоянного магнита – молекулы втягиваются в область с большей напряженностью из области с меньшей напряженностью магнитного поля. Это явление позволяет создать условия для возникновения термомагнитной конвекции.

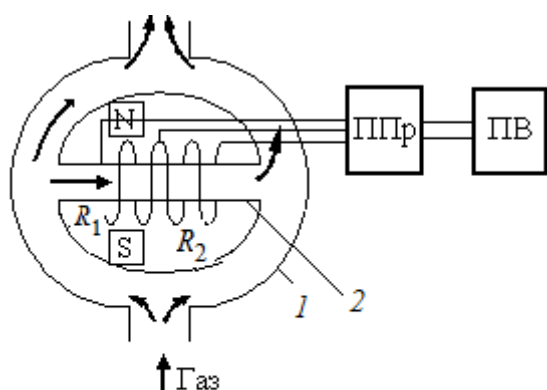


Рис. 7.3. Схема термомагнитного газоанализатора

Газовая смесь, содержащая кислород, прокачивается через кольцевую камеру 1 с перемычкой 2, на которую намотаны два терморезистора  $R_1$  и  $R_2$ , выполняющие функции теплового расходомера (рис. 7.3). В левой части перемычки установлены полюсные наконечники постоянного магнита  $N$  и  $S$ . Если в газовой смеси отсутствует кислород, то поток газа через перемычку отсутствует. При

наличии кислорода в газовой смеси молекулы кислорода втягиваются в перемычку, где напряженность магнитного поля наибольшая. За счет тепла, выделяющегося при прохождении тока через терморезистор  $R_1$ , кислород нагревается до температуры выше точки Кюри ( $80^\circ\text{C}$ ), теряет парамагнитные свойства и проталкивается по перемычке вправо. Возникает поток кислорода в перемычке, называемый магнитным ветром. Расход кислорода в перемычке измеряется тепловым расходомером: за счет того, что терморезистор  $R_1$  отдает тепло на нагрев потока кислорода, температура и сопротивление его уменьшаются; поток кислорода нагревает терморезистор  $R_2$ , поэтому повышаются его температура



и сопротивление. Разность сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  зависит от расхода кислорода по перемычке, а следовательно, от объемной концентрации кислорода в анализируемой газовой смеси. Терморезисторы  $R_1$  и  $R_2$  включены в плечи неуравновешенного моста – промежуточного преобразователя ППр, напряжение небаланса которого измеряется автоматическим потенциометром ПВ. Пределы измерений объемного содержания кислорода в газовой смеси – от 0 до 100 %.

Газоанализаторы поставляются в комплекте с прибором вторичным. Классы точности –  $2,5 \div 5$ .

#### 7.4. Пламенно-ионизационные газоанализаторы

Действие пламенно-ионизационных газоанализаторов основано на явлении ионизации молекул органических веществ в пламени водорода, вследствие чего изменяется ионизационный ток в ионизационной камере 1 (рис. 7.4).

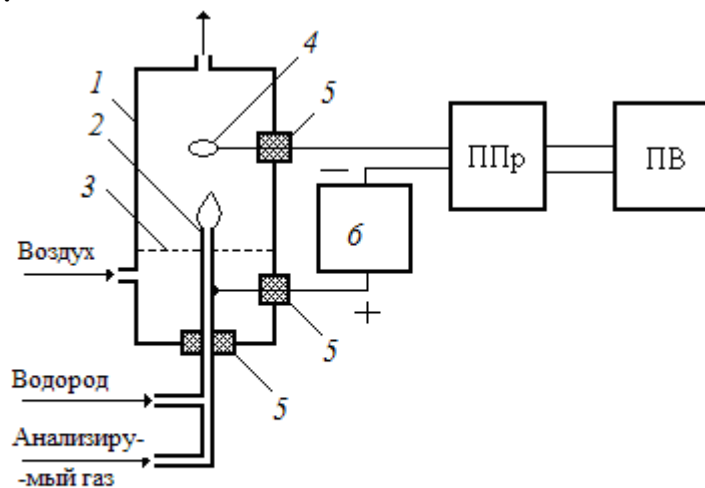


Рис. 7.4. Схема пламенно-ионизационного газоанализатора

Водород подается в ионизационную камеру 1 через горелку 2, установленную на фторопластовом изоляторе 5. Над горелкой установлен коллекторный электрод 4. На горелку и коллекторный электрод от специального источника 6 подается напряжение, создающее электрическое поле. При сгорании водорода ионов не образуется, ионный ток практически равен нулю. При сгорании органических веществ, поступающих с анализируемой газовой смесью, образуются ионы, поэтому, в зависимости от величины массовой концентрации органических веществ, увеличивается ионный ток, который промежуточным преобразователем ППр преобразуется в унифицированный сигнал, измеряемый автоматическим потенциометром ПВ. Классы точности –  $5,0 \div 15$ .

## 7.5. Оптико-абсорбционные газоанализаторы

Действие большой группы оптических приборов основано на избирательном поглощении электромагнитных колебаний определяемым компонентом газовой смеси в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$\Phi_{\lambda} = \Phi_{0\lambda} e^{-\varepsilon Cl}, \quad (7.2)$$

где  $\Phi_{0\lambda}$  и  $\Phi_{\lambda}$  – интенсивность монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ , входящего в слой анализируемого вещества и выходящего из него;  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения излучения с длиной волны  $\lambda$ ;  $C$  – концентрация поглощающего вещества;  $l$  – толщина слоя вещества.

Анализаторы, использующие поглощение электромагнитного излучения инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой области спектра, называют **фотометрическими**.

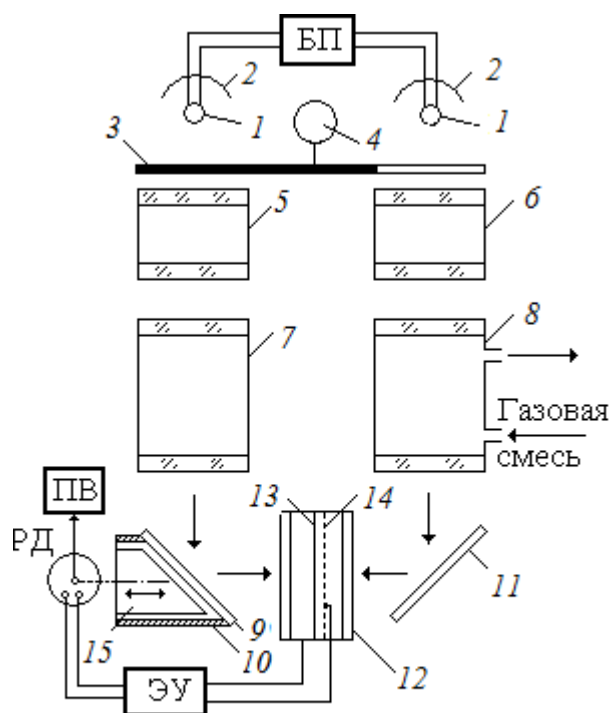


Рис. 7.5. Схема газоанализатора инфракрасного поглощения

**Газоанализаторы инфракрасного поглощения** применяются для измерения в многокомпонентных смесях концентрации газов: водорода, оксида углерода, диоксида углерода, метана, аммиака, ацетилена и др. Конструктивно они выполняются однолучевыми и двухлучевыми.

Один из вариантов двухлучевого газоанализатора приведен на рис. 7.5. Потoki инфракрасного излучения от источников 1, расположенных внутри отражателей 2, прерываемые обтюратором 3, поступают поочередно в сравнительный и рабочий каналы через фильтровальные камеры 5 и 6, заполненные неопределяемыми компонентами анали-

зируемой газовой смеси, полосы поглощения которых частично перекрываются полосами поглощения определяемого компонента. Затем потоки излучения поступают в сравнительную камеру 7, заполненную газовой смесью из неопределяемых компонентов и не поглощающих инфракрасное излучение газом, и в рабочую камеру 8, через которую прокачивается анализируемая газовая смесь. В рабочей камере инфракрасное излучение частично поглощается определяемым компонентом в со-

ответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера и с помощью отражателя 11 поступает в правую камеру лучеприемника. При поглощении излучения в камерах лучеприемника, разделенных мембраной 13, увеличивается температура и давление. Если в анализируемой смеси нет определяемого компонента, то в камеры лучеприемника 12, заполненные определяемым компонентом, поступает излучение одинаковой интенсивности. Амплитуды колебания давления в камерах будут одинаковые, поэтому мембрана 13 не будет колебаться. При увеличении концентрации определяемого компонента в газовой смеси уменьшатся интенсивность пришедшего в соответствующую камеру лучеприемника излучения и амплитуда колебания давления. Вследствие разницы давлений мембрана 13 будет колебаться с частотой  $5 \div 6$  Гц, определяемой частотой вращения обтюлятора, а амплитуда колебаний мембраны будет зависеть от концентрации определяемого компонента. Мембрана 13 вместе с изолированной пластиной 14 образуют конденсаторный микрофон, емкость которого изменяется при изменении амплитуды колебаний мембраны. Микрофон включен во входной каскад электронного усилителя ЭУ, управляющего работой реверсивного двигателя РД. Выходной вал реверсивного двигателя с помощью редуктора начнет перемещать плунжер 15 компенсатора 10. При этом будет изменяться толщина поглощающего слоя газа между стеклянной крышкой 9 и отражателем плунжера 15 до тех пор, пока излучения, пришедшие в лучеприемник, не станут равными. Реверсивный двигатель остановится. Таким образом, каждому положению плунжера 15 в состоянии равновесия соответствует определенная концентрация определяемого компонента в определяемой газовой смеси. Одновременно с плунжером перемещается стрелка вторичного прибора ПВ. Первоначально обтюратор 3 вращался электрическим двигателем 4 с частотой звуковых колебаний (200 Гц), поэтому газоанализаторы получили название оптико-акустических и сохранили это название до настоящего времени. Класс точности –  $2,5 \div 4,0$ . Выходной сигнал –  $0 \div 5$  мА.

**Газоанализаторы ультрафиолетового поглощения** применяются для измерения концентрации газов и паров: диоксида углерода, ртути, хлора, сернистого ангидрида, сероводорода, сероуглерода, формальдегида, фосгена, хлора, четыреххлористого углерода. Конструктивно они выполняются однолучевыми и двухлучевыми. В качестве источника ультрафиолетового излучения применяются ртутные, ртутно-кадмиевые, кадмиевые, водородные лампы. В качестве приемников излучения применяются фотоэлементы, фотосопротивления и фотоумножители, чувствительные к ультрафиолетовому излучению. Классы точности –  $2,0 \div 10,0$ .

**Фотокolorиметрические газоанализаторы** основаны на погло-

щении видимой части спектра электромагнитного излучения (рис. 7.6) и обычно имеют один источник излучения (лампа 1) и два приемника (фотоэлементы 7 и 8).

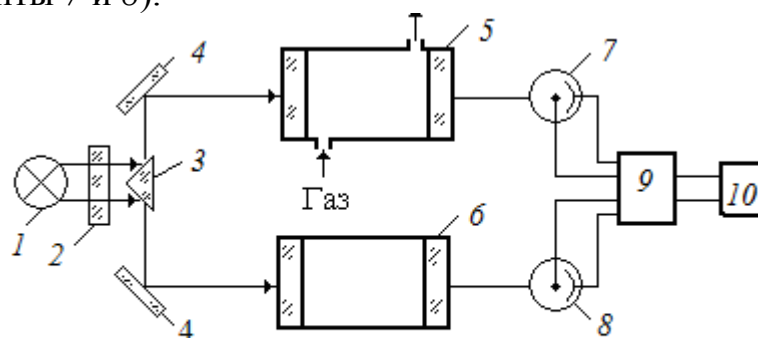


Рис. 7.6. Схема фотоколориметрического газоанализатора

Световой поток от лампы накаливания 1 проходит через светофильтр 2 и призмой 3 делится на два луча, которые с помощью зеркал 4 поступают в рабочую 5 и сравнительную 6 камеры. Через рабочую камеру прокачивается анализируемая газовая смесь, а сравнительная камера заполнена эталонной газовой смесью с определенным содержанием измеряемого компонента. Световые потоки после камер поступают на фотоэлементы 7 и 8 соответственно. Фотоэлементы включены встречно, поэтому на вход усилителя 9 поступает сигнал, пропорциональный разности концентраций определяемого компонента в анализируемой и эталонной газовых смесях. Унифицированный сигнал с выхода усилителя 9 поступает на прибор вторичный 10.

Действие **турбидиметрических** газоанализаторов основано на явлении рассеяния света в дисперсной среде в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kl}, \quad (7.3)$$

где  $k$  – показатель рассеяния излучения, зависящий от концентрации частиц, их размера и формы, а также от коэффициента преломления материала частиц и среды;  $l$  – толщина слоя анализируемого газа.

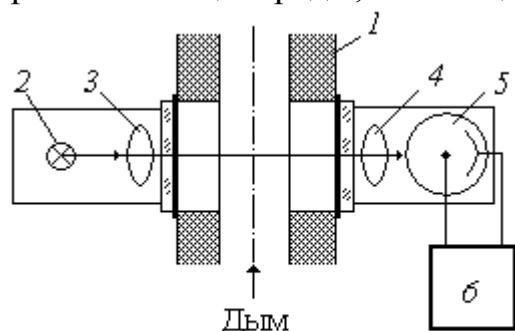


Рис. 7.7. Схема турбидиметрического газоанализатора

Поток света от источника 2 (рис. 7.7) через линзу 3 поступает в трубопровод 1, через который протекает поток дымовых газов, содержащих частицы сажи. Частицы сажи частично рассеивают световой поток, который через линзу 4 поступает на приемник излучения 5 (фотоэлемент). Сигнал, формируемый приемником излучения,

измеряется прибором вторичным 6. Шкала прибора градуируется в массовых или объемных концентрациях.

Действие **нефелометров** основано на явлении рассеяния света дисперсной средой и измерении отраженного этой средой светового потока

$$\Phi = \Phi_0 a c, \quad (7.4)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от длины световой волны, плотности материала частиц, их объема, показателей преломления материала частиц и среды, угла между падающим и отраженным потоком

света, размеров слоя анализируемой среды.

Поток анализируемого газа, содержащего дисперсные материалы, прокачивается через камеру 1 (рис. 7.8). Поток света от источника 2 поступает в камеру 1 и частично рассеивается. Отраженный поток, прерываемый

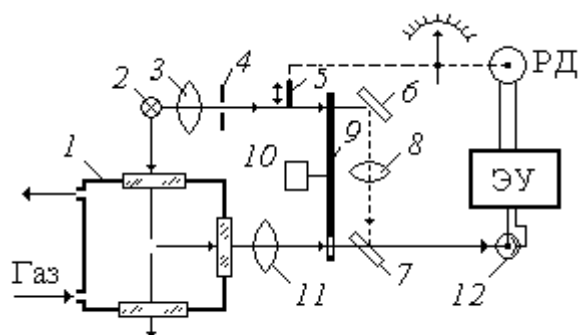


Рис. 7.8. Схема нефелометра

обтюратором 9, через линзу 11 попадает на фотоэлемент 12. Кроме этого, второй поток света, также прерываемый обтюратором 9, через линзу 3, диафрагму 4 с помощью зеркал 6 и 7 поступает на фотоэлемент. Обтюратор вращается с помощью двигателя переменного тока 10 с постоянной частотой и имеет одно отверстие, поэтому свет на фотоэлемент поступает поочередно, что позволяет сравнивать интенсивность световых потоков. Если интенсивности потоков не совпадают, то электронный усилитель ЭУ включит реверсивный двигатель РД, выходной вал которого переместит заслонку 5 так, чтобы интенсивности потоков совпали. В момент равновесия каждому положению заслонки соответствует определенная концентрация дисперсных материалов в определяемой газовой смеси. Одновременно с заслонкой выходной вал реверсивного двигателя перемещает стрелку вторичного прибора.

## 7.6. Сорбционные газоанализаторы

Действие сорбционных газоанализаторов основано на использовании механических, тепловых, оптических и электрических эффектов, сопровождающих процесс сорбции газов и паров: водорода, пропана, бутана, диоксида углерода и др.

В **дилатометрическом газоанализаторе** используется механический эффект удлинения тонкостенной трубки из палладия (рис. 7.9).

Водород растворяется в палладии, и за счет набухания при увели-

чении концентрации водорода увеличивается длина трубки 2, один конец которой закреплен на корпусе 1. При этом свободный конец трубки с закрепленной пластиной 3 перемещается. Это перемещение пластины с помощью преобразователей 4 (пневматического, емкостного, индуктивного) измеряется, преобразуется в унифицированный сигнал и передается на вторичный прибор.

Для измерения концентрации других газов вместо трубки может быть использован стержень из активированного угля, алюмогеля, силикагеля.

В другом типе газоанализаторов используется измерение накопленной в процессе сорбции массы определяемого компонента (рис. 7.10).

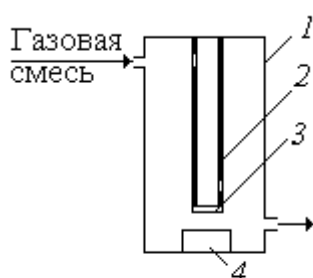


Рис. 7.9. Схема дилатометрического газоанализатора

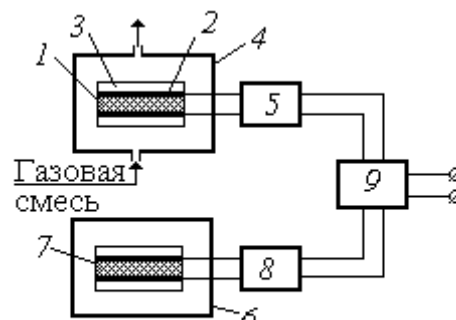


Рис. 7.10. Схема сорбционного газоанализатора

На кварцевую пластинку 1 напыляется электрод 2, на который наносится слой сорбента 3. Через рабочую камеру 4 прокачивается анализируемая газовая смесь. Определяемый компонент сорбируется слоем сорбента. Его масса изменяет частоту колебаний пластинки 1 и частоту колебаний генератора 5, в колебательный контур которого включена пьезоэлектрическая пластинка 1. В сравнительной камере 6 размещена аналогичная пластинка 7, которая обеспечивает постоянную частоту колебаний генератора 8. В результате сравнения частот в устройстве 9 определяется частота биения  $\Delta f = km$ , линейно зависящая от массы сорбированного вещества. Частота биения преобразуется в унифицированный сигнал и передается на прибор вторичный.

Такого типа сорбционные газоанализаторы используются для измерения концентрации  $H_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$  и паров  $HCl$ ,  $Hg$ ,  $H_2O$ , ароматических углеводородов и других веществ.

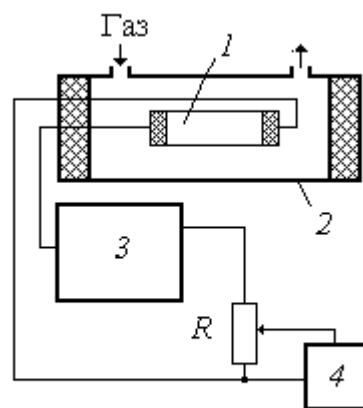


Рис. 7.11. Схема сорбционного газоанализатора

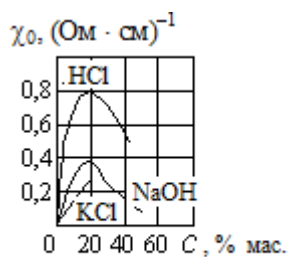


Рис. 7.12

В *электрокондуктометрических газоанализаторах* используется изменение электрической проводимости адсорбентов при сорбции газов и паров. Адсорбенты изготавливаются в виде гранул, пластин и пленок из полупроводниковых материалов. Например, пленочный чувствительный элемент *1* изготавливается из окиси цинка, нанесенной на боросиликатную подложку (рис. 7.11). При проте-

кании анализируемой газовой смеси через рабочую камеру *2* определяемый компонент сорбируется на пленке, изменяя её электрическое сопротивление. Сопротивление пленки измеряется с помощью измерительных схем *3, 4*. В результате на выходе преобразователя *4* формируется унифицированный сигнал, измеряемый прибором вторичным.

## 7.7. Методы анализа растворов

Действие *электрокондуктометрических анализаторов* (кондуктометров) основано на зависимости электропроводности растворов электролитов от их концентрации. При растворении электролиты диссоциируют с образованием положительных и отрицательных ионов, в результате чего раствор приобретает способность проводить электрический ток. Количественно процесс диссоциации характеризуют величиной, называемой степенью диссоциации  $\alpha$ , определяющейся отношением числа диссоциированных молекул к общему числу растворенных молекул. А способность раствора проводить электрический ток характеризуется удельной электропроводностью

$$\chi_0 = 1/\rho = \chi l/s, \quad (7.5)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление раствора;  $\chi$  – электрическая проводимость раствора;  $l$  – длина проводника;  $s$  – площадь поперечного сечения проводника.

Для разбавленных растворов (до 100 мг/л) зависимость удельной электропроводности от концентрации практически линейная. С увеличением концентрации эта зависимость становится нелинейной и даже неоднозначной (рис. 7.12).

С увеличением температуры электропроводность растворов возрастает, так как при этом увеличивается число ионов, поэтому измерение концентрации производится либо при стандартной температуре раствора, либо автоматически вводится поправка на изменение температуры.

Электропроводность растворов обычно измеряется в измерительных ячейках: контактных или бесконтактных.

По числу электродов измерительные ячейки бывают двух-, трех- и четырехэлектродные (рис. 7.13).

В ячейку 1 (рис. 7.13, а) помещаются два электрода – 2 и 3, изготовленные из инертного материала. При прохождении переменного электрического тока между электродами жидкий проводник оказывает сопротивление

$$R_x = 1/(\chi K), \quad (7.6)$$

где  $K$  – константа измерительной ячейки, определяемая экспериментально.

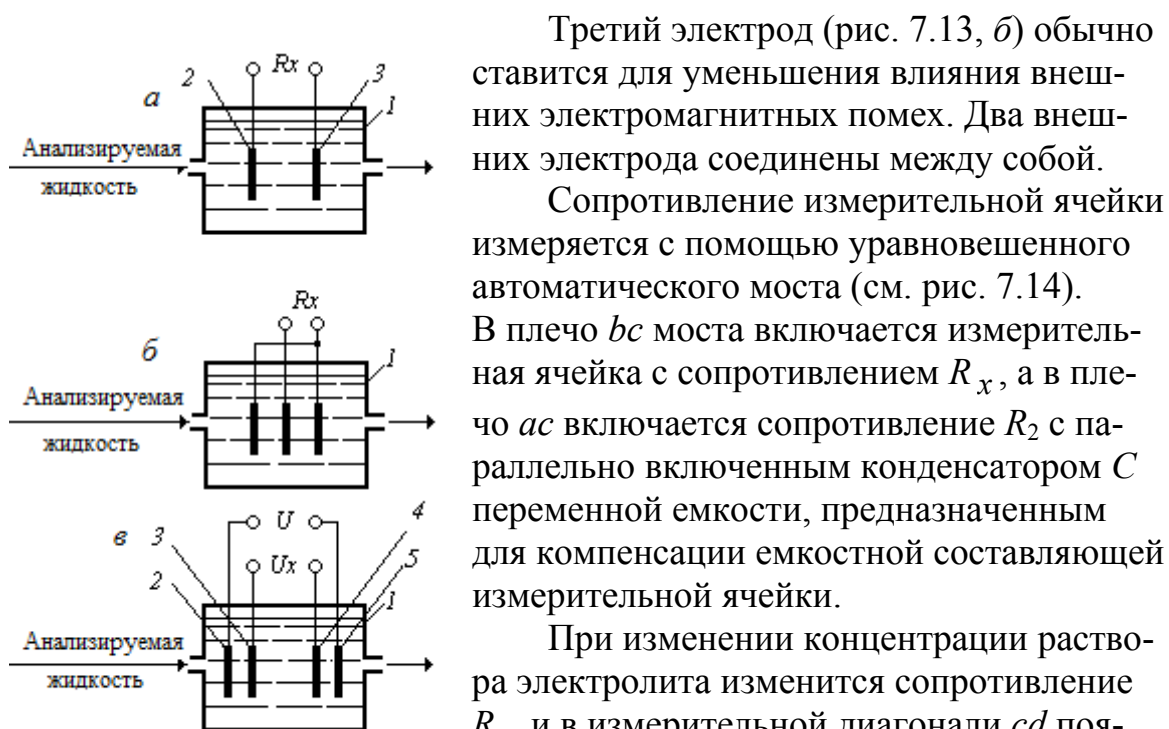


Рис. 7.13. Схемы измерительных ячеек

Третий электрод (рис. 7.13, б) обычно ставится для уменьшения влияния внешних электромагнитных помех. Два внешних электрода соединены между собой.

Сопротивление измерительной ячейки измеряется с помощью уравновешенного автоматического моста (см. рис. 7.14). В плечо  $bc$  моста включается измерительная ячейка с сопротивлением  $R_x$ , а в плечо  $ac$  включается сопротивление  $R_2$  с параллельно включенным конденсатором  $C$  переменной емкости, предназначенным для компенсации емкостной составляющей измерительной ячейки.

При изменении концентрации раствора электролита изменится сопротивление  $R_x$  и в измерительной диагонали  $cd$  появится напряжение небаланса  $U_{cd}$ , которое поступит на вход электронного усилителя

ЭУ. Электронный усилитель, работающий в режиме фазочувствительного реле, включит реверсивный двигатель РД, выходной вал которого переместит движок реохорда до состояния равновесия. Поэтому в состоянии равновесия каждому положению движка реохорда будет соответствовать определенная концентрация раствора электролита. Вместе с движком реохорда перемещается стрелка вторичного прибора.



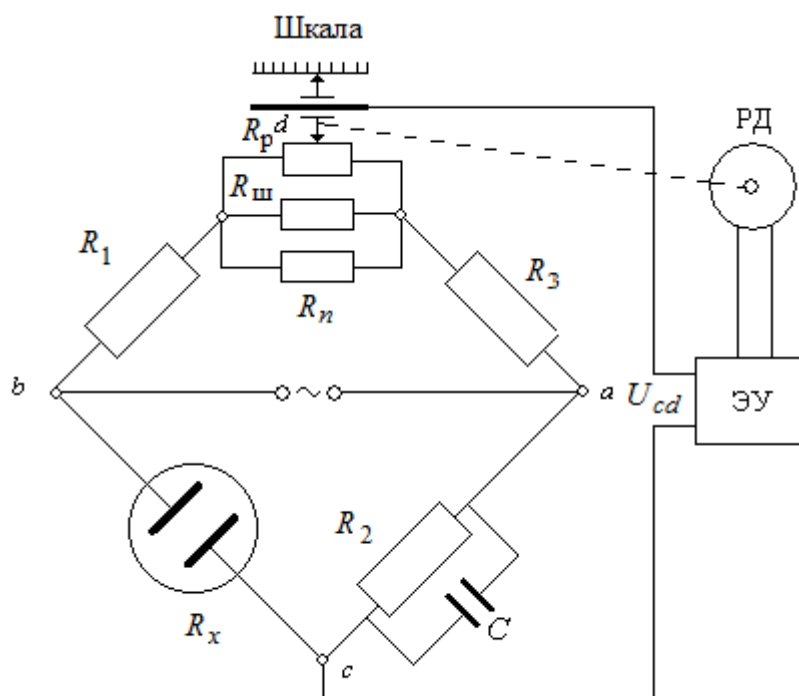


Рис. 7.14. Схема автоматического кондуктометра

Для повышения точности измерения и исключения влияния окружающей среды вместо сопротивления  $R_2$  и конденсатора  $C$  можно включить измерительную ячейку, заполненную раствором электролита с известной концентрацией.

В случае четырехэлектродной ячейки (рис. 7.14, в) напряжение  $U$  подается на внешние электроды 2 и 5 через сопротивление  $R$  (см. рис. 7.15). Величина тока, протекающего в замкнутом контуре, зависит от суммы сопротивлений резистора  $R$  и жидкого проводника на участке между электродами 2 и 5:

$$I = U / (R + R_{25}). \quad (7.7)$$

Если балластное сопротивление  $R$  сделать намного больше, чем  $R_{25}$ , то ток  $I$  можно считать величиной постоянной:

$$I = \frac{U}{R(1 + R_{25}/R)} \approx \frac{U}{R} = \text{const}. \quad (7.8)$$

Тогда падение напряжения на электродах 3 и 4 будет зависеть только от сопротивления  $R_x$ :

$$U_{34} = IR_x = kR_x. \quad (7.9)$$

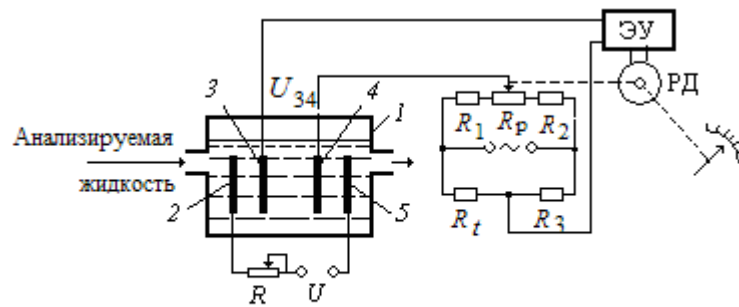


Рис. 7.15. Схема автоматического кондуктометра с четырехэлектродной измерительной ячейкой

Падение напряжения  $U_{34}$  измеряется с помощью автоматического потенциометра методом сравнения с напряжением, генерируемым в измерительной диагонали. При изменении концентрации раствора электролита изменится напряжение  $U_{34}$ , и напряжение небаланса поступит на вход электронного усилителя ЭУ, который включит реверсивный двигатель РД, выходной вал которого переместит движок реохорда  $R_p$  до состояния равновесия. Таким образом, в состоянии равновесия каждому положению движка реохорда соответствует определенное значение напряжения  $U_{34}$ , а следовательно, в соответствии с выражением (7.9), определенное значение концентрации анализируемого раствора. Одновременно выходной вал реверсивного двигателя перемещает стрелку вторичного прибора. Резистор  $R_t$  предназначен для автоматического внесения поправки на изменение температуры измеряемого раствора.

На рис. 7.16 приведена схема низкочастотного бесконтактного кондуктометра.

Анализируемый раствор электролита прокачивается через замкнутый виток трубы, изготовленной из диэлектрика. На трубку намотаны обмотки трансформаторов Тр1 и Тр2. На первичную обмотку  $W_1$  подается напряжение переменного тока  $U$ . Вторичной обмоткой трансформатора Тр1 служит жидкий проводник – анализируемый раствор, в котором индуцируется ЭДС:

$$E_p = U w_1 / w_2, \quad (7.10)$$

где  $w_1$  – число витков первичной обмотки трансформатора;  $w_2 = 1$  – жидкостный виток.

Под действием индуцированной ЭДС в замкнутом жидкостном проводнике возникает ток

$$I = E_p / R = E_p \chi / k_p = \frac{U w_1}{k_p w_2} \chi = k \chi, \quad (7.11)$$

где  $R$  – сопротивление жидкостного витка;  $k_p$  – константа измерительной ячейки;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

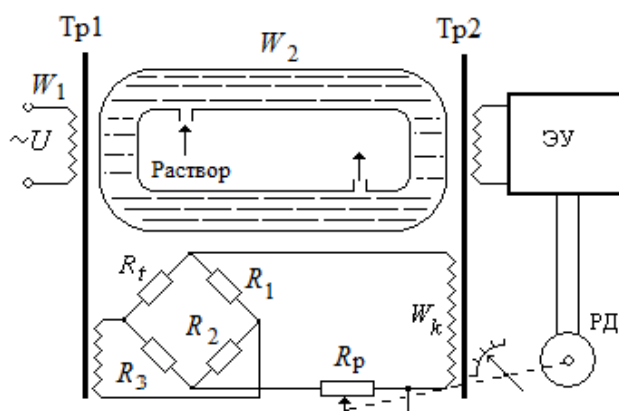


Рис. 7.16. Схема бесконтактного низкочастотного кондуктометра

Из этого выражения следует, что между током, протекающим в жидком проводнике, и концентрацией раствора электролита имеет место линейная зависимость. Величина тока измеряется методом компенсации. Трансформатор Tr2 является токовым, поэтому в его вторичной обмотке появляется напряжение, которое поступает на вход электронного усилителя ЭУ. Последний включает реверсивный двигатель РД, выходной вал которого перемещает движок реохорда  $R_p$ , что приведет к изменению тока  $I_k$ , протекающего по компенсационной обмотке  $w_k$ . Условие компенсации имеет вид

$$I_k w_k = I w_2, \text{ или } I_k = I / w_k \text{ при } w_2 = 1.$$

Таким образом, компенсационный ток линейно связан с током, протекающим по жидкому проводнику, а, следовательно, в состоянии равновесия каждому положению движка реохорда будет соответствовать определенное значение концентрации раствора электролита. Выходной вал реверсивного двигателя одновременно перемещает стрелку вторичного прибора.

Для автоматического введения поправки на изменение температуры раствора в одно из плеч неуравновешенного моста включен терморезистор  $R_t$ .

Электрокондуктометрические газоанализаторы используются для контроля концентрации растворов щелочей, кислот, солей и других растворов. Класс точности – 1,0÷5,0.

Действие **абсорбционно-оптических** анализаторов состава жидкостей основано на свойстве поглощать (абсорбировать) электромагнитное излучение в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера (7.2). Определяемый компонент должен иметь коэффициент поглощения значительно больший, чем неопределяемые компоненты.

Поток излучения пропускается через измерительную кювету с анализируемой жидкостью. По степени поглощения излучения определенной длины волны измеряется концентрация определяемого компонента в жидкости.

Схемы анализаторов бывают двух типов: одноканальные двухлучевые и двухканальные однолучевые. Одноканальные анализаторы имеют большие погрешности измерения из-за различного загрязнения окон кювет и других элементов. Двухканальные анализаторы обеспечивают минимальные погрешности от загрязнения окон кювет, но допускают несколько большие погрешности от изменения спектральных характеристик элементов схемы (рис. 7.17).

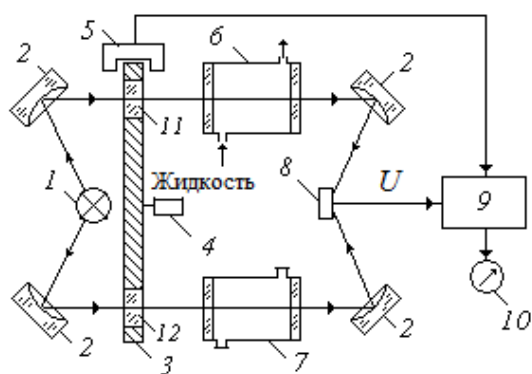


Рис. 7.17. Схема двухканального анализатора

Поток электромагнитного излучения от излучателя 1 с помощью зеркал 2 направляется в рабочую 6 и сравнительную 7 кюветы. Обтюратором 3, вращаемым приводом 4, поток прерывается. При этом светофильтры 11 и 12, пропускающие излучение длиной волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , поочередно вводятся в потоки излучения. Поток излучения, проходя через рабочую кювету, ослабляется за

счет поглощения определяемым компонентом в зависимости от его концентрации (7.2). Поток излучения, проходящий через сравнительную кювету, ослабляется на постоянную величину, так как концентрация определяемого компонента здесь остается постоянной.

Оба потока поочередно попадают на приемник излучения 8, который поочередно во времени выдает напряжения, пропорциональные монохроматическому излучению длиной волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Эти сигналы обрабатываются вычислительным устройством 9 с учетом положения светофильтров, фиксируемого датчиком 5, и направляются на прибор вторичный 10.

Анализаторы жидкостей данного типа применяются для измерения концентрации азотной кислоты в любых диапазонах; воды в метаноле, ацетоне, этиловом спирте, меланже, серной и азотной кислотах, нитроолеуме; уксусной кислоты; уксусного ангидрида; органических микропримесей в сточных водах; масел в растворителях и др. Основная погрешность – 4 % от диапазона шкалы прибора.

## 7.8. Измерение плотности жидкостей

**Плотностью** вещества принято называть отношение массы к объему:

$$\rho = m / V. \quad (7.12)$$

Основная единица измерения – кг/м<sup>3</sup>.

**Относительной плотностью** жидкости  $\rho_4^{20}$  принято называть

отношение её плотности, взятой при нормальной температуре (20 °С), к плотности дистиллированной воды при температуре 4 °С.

Плотность жидкостей уменьшается с повышением температуры и практически не зависит от давления.

Приборы для измерения плотности вещества получили название **плотномеров**. Наиболее широкое распространение для измерения плотности жидкостей получили поплавковые, весовые и гидростатические плотномеры.

Действие **поплавковых плотномеров** основано на измерении выталкивающей (Архимедовой) силы, действующей на поплавок. Плотномеры с плавающим или частично погруженным поплавком неавтоматические получили название **ареометры**.

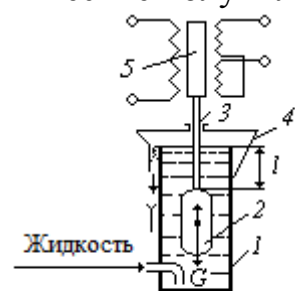


Рис. 7.18. Схема плотномера поплавкового

**Автоматический поплавковый плотномер** представляет собой проточный сосуд 1 с переливом для поддержания постоянного уровня жидкости, вытекающей через сборник 4. В сосуд помещен поплавок 2 с цилиндрической частью 3, соединенной с плунжером 5 дифференциального трансформатора-датчика.

На поплавок действует сила тяжести  $G$  и выталкивающая сила

$$F = V\rho g + l s \rho g, \quad (7.13)$$

где  $V$  – объем поплавка;  $\rho$  – плотность жидкости;  $l$  – глубина погружения цилиндрической части 3;  $s$  – площадь поперечного сечения цилиндрической части 3;  $g$  – ускорение свободного падения.

В состоянии равновесия силы  $G$  и  $F$  должны быть равны. Тогда получим

$$l = \frac{G}{s\rho g} - \frac{V}{s} = k_1 \frac{1}{\rho} - k_2, \quad (7.14)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – постоянные величины. Следовательно, между перемещением плунжера 5 и измеряемой плотностью жидкости имеет место линейная обратная зависимость. Выходной сигнал дифференциального трансформатора-датчика подается на прибор вторичный, имеющий

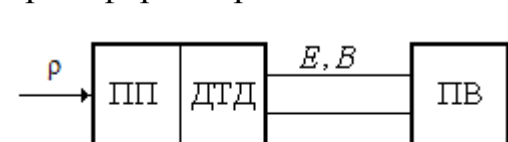


Рис. 7.19. Измерительный комплект поплавкового плотмера

дифференциальный трансформатор-приемник. Прибор вторичный поставляется в комплекте с плотномером (рис. 7.19).

Поплавковые плотномеры с частично погруженным поплавком обладают высокой чувствительностью, поэтому возможно измерение плот-

ности в узком диапазоне с погрешностью  $1,5 \div 3,0$  % от диапазона шкалы прибора.

**Поплавковые плотномеры с полностью погруженным поплавком** (рис. 7.20) измеряют плотность жидкости по величине выталкивающей силы, действующей на полностью погруженный в измеряемую жидкость поплавок, с использованием пневматических преобразователей типа «сила – давление» (рис. 7.20) и электрических – «сила – ток».

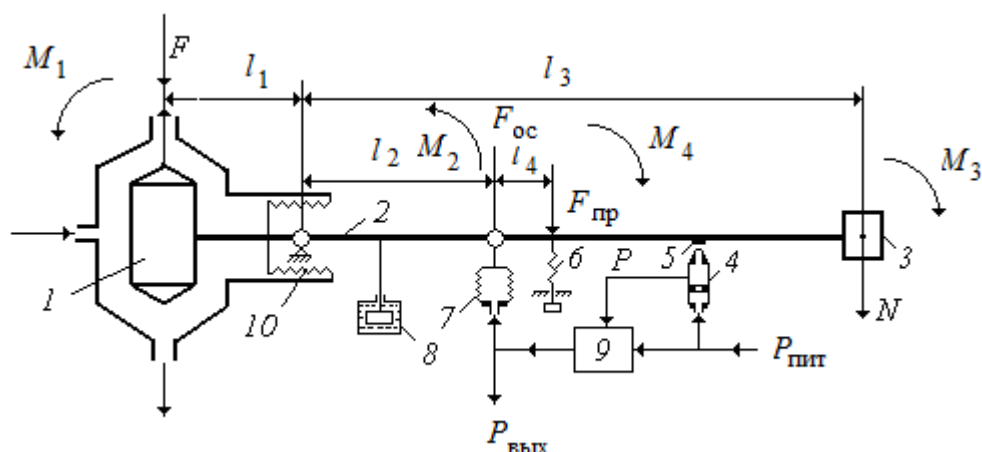


Рис. 7.20. Схема плотномера с полностью погруженным поплавком

При постоянном значении плотности жидкости  $\rho$  сумма моментов сил, действующих на рычаг 2, равна нулю:

$$M_1 + M_2 - M_3 - M_4 = 0, \quad (7.15)$$

где  $M_1 = Fl_1 = (G - V\rho g)l_1$  – момент силы  $F$ , равный разности веса поплавка  $G$  и выталкивающей (Архимедовой) силы, действующей на поплавок  $V$  – объем поплавка;  $M_2 = F_{ос}l_2 = S_{эф}P_{вых}l_2$  – момент силы обратной связи, развиваемой доньшком сиффона 7 под действием давления  $P_{вых}$ ;  $S_{эф}$  – эффективная площадь доньшка сиффона;  $M_3 = Nl_3$  – момент, развиваемый противовесом 3;  $M_4 = \delta_{пр}\Delta l_4$  – момент силы, развиваемой пружиной 6 корректора.

Подставляя в (7.15) выражения для моментов сил, получим

$$Gl_1 - \rho gl_1 + S_{эф}P_{вых}l_2 - Nl_3 - \delta_{пр}\Delta l_4 = 0. \quad (7.16)$$

Вес  $N$  противовеса рассчитывается из условия равенства моментов:

$$Gl_1 = Nl_3, \quad N = Gl_1/l_3. \quad (7.17)$$

Из равенства (7.16), с учетом (7.17), получим

$$P_{вых} = \frac{Vgl_1}{S_{эф}l_2}\rho + \frac{\delta_{пр}l_4}{S_{эф}l_2}\Delta l. \quad (7.18)$$

В соответствии с требованиями ГСП при  $\rho = 0$  выходное давление

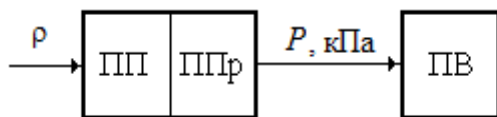


Рис. 7.21. Измерительный комплект поплавкового плотномера пневматического

стрелки вторичного прибора на начальную отметку шкалы. Тогда уравнение (7.18) можно записать в виде

$$P_{\text{вых}} = k\rho + 20, \quad (7.19)$$

где  $k = \frac{Vgl_1}{S_{\text{эф}}l_2}$  – коэффициент передачи плотномера.

Между выходным давлением  $P_{\text{вых}}$  и измеряемой плотностью жидкости в сосуде в состоянии равновесия имеет место линейная зависимость. Шкала вторичного прибора должна быть равномерная.

Демпфер 8 предназначен для предотвращения автоколебаний в измерительной системе плотномера.

При повышении плотности жидкости  $\rho$  увеличивается выталкивающая сила, действующая на поплавок. Рычаг 2 поворачивается по часовой стрелке, что вызывает приближение заслонки 4 к соплу 5. Увеличивается давление воздуха внутри сопла  $P$ , которое после усиления по мощности в усилителе 9 поступает на сильфон обратной связи 7 и на выход  $P_{\text{вых}}$ . Повышение выходного давления приводит к увеличению компенсирующего усилия  $F_{\text{ос}}$ , развивающегося на доннышке сильфона, до состояния равновесия, при котором выполняется условие (7.15).

Класс точности – 1,0.

Измерительный комплект состоит из первичного поплавкового преобразователя плотности ПП со встроенным пневматическим преобразователем ППр и прибора вторичного ПВ (рис. 7.21).

**Плотномер поплавковый электрический** с преобразователем типа «сила – ток» имеет первичный преобразователь плотности в усилие, аналогичный рассмотренному выше. Усилие с помощью передаточного механизма воздействует на электросиловой преобразователь, на выходе которого формируется унифицированный токовый сигнал.

Измерительный комплект состоит из первичного поплавкового преобразователя уровня ПП со встроенным электросиловым преобразователем ЭПр и прибора вторичного ПВ (рис. 7.22).

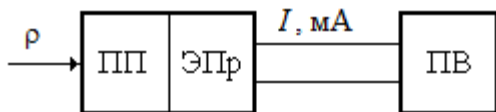


Рис. 7.22. Измерительный комплект поплавкового плотномера электрического

Преобразователя уровня ПП со встроенным электросиловым преобразователем ЭПр и прибора вторичного ПВ (рис. 7.22).

Действие **весовых плотномеров** основано на измерении веса



определенного объема жидкости, находящейся в трубопроводе, в соответствии с известным соотношением

$$\gamma = \rho g = mg / V, \quad (7.20)$$

где  $\gamma$  – удельный вес вещества.

Через U-образную трубку 1, изготовленную из нержавеющей стали, прокачивается анализируемая жидкость (рис. 7.23). Масса трубки зависит от плотности жидкости. При увеличении плотности жидкости увеличивается масса трубки с жидкостью и усилие через рычаг 2 передается на коромысло 3, выводя его из равновесия. Преобразователь 4 компенсирует это усилие и преобразует в пневматический или электрический унифицированный сигнал, измеряемый прибором вторичным. Специальное устройство вводит поправку на изменение температуры анализируемой жидкости. Класс точности – 1,0; 1,5.

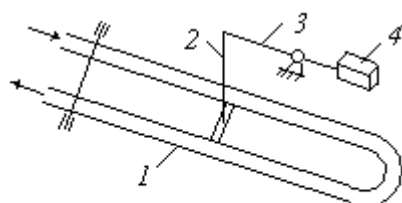


Рис. 7.23. Схема весового плотномера

Измерительный комплекс по структуре подобен структуре поплавковых плотномеров (рис. 7.21 и 7.22).

Действие **гидростатических плотномеров** основано на зависимости гидростатического давления столба жидкости от плотности  $\rho$ :

$$P = H\rho g, \quad (7.21)$$

где  $H$  – высота столба жидкости.

Если обеспечить постоянное значение высоты столба жидкости  $H$ , то давление  $P$  будет линейно зависеть от плотности  $\rho$ :

$$P = k\rho, \quad (7.22)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

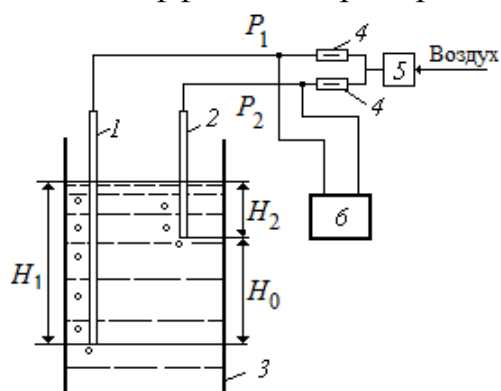


Рис. 7.24. Схема гидростатического плотномера

Трубки 1 и 2 погружены в мерный сосуд 3, заполненный анализируемой жидкостью (рис. 7.24). Глубина погружения трубок  $H_1$  и  $H_2$  разная. От регулятора расхода 5 через пневматические дроссели 4 поступает воздух. Он барботирует через жидкость. В трубках устанавливаются соответствующие давления:

$$P_1 = H_1\rho g, \quad (7.23)$$

$$P_2 = H_2\rho g. \quad (7.24)$$



Разность давлений  $P_1$  и  $P_2$  измеряется дифференциальным манометром 6 с пневматическим или электрическим преобразователем:

$$P_1 - P_2 = H_1 \rho g - H_2 \rho g = (H_1 - H_2) g \rho = H_0 g \rho = k p. \quad (7.25)$$

Отсюда следует, что величина разности давлений линейно связана с плотностью анализируемой среды. Выходной пневматический или электрический сигнал поступает на вход прибора вторичного.

Измерительные комплекты гидростатических плотномеров аналогичны приведенным на рис. 7.21 и 7.22. Первичным преобразователем является гидростатический плотномер с преобразователями и прибор вторичный.

## 7.9. Измерение вязкости жидкостей

**Под вязкостью понимают свойство жидкостей сопротивляться деформации сдвига.** Для обеспечения движения одного слоя жидкости относительно другого необходимо приложить усилие  $F$ , определяемое основным законом течения вязких жидкостей по формуле Ньютона:

$$F = \mu S \frac{dv}{dn}, \quad (7.26)$$

где  $F$  – сила сдвига, или тангенциальная сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости друг относительно друга;  $S$  – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;  $dv/dn$  – градиент скорости течения по нормали  $n$ ;  $v$  – скорость движения слоя относительно другого, находящегося на расстоянии  $n$ ;  $\mu$  – **динамическая вязкость**.

За единицу динамической вязкости принимают вязкость жидкости, в которой напряжение сдвига, создаваемое силой 1 Н между двумя слоями площадью 1 м<sup>2</sup>, вызывает градиент скорости 1 м/с при расстоянии между слоями 1 м (Па · с). На практике часто используется понятие **кинематической вязкости**, равной отношению динамической вязкости к плотности  $\mu/\rho$ . Единица измерения кинематической вязкости – м<sup>2</sup>/с.

Приборы для измерения вязкости называют **вискозиметрами**.

Принцип действия **вискозиметров истечения** основан на законе Пуазейля, описывающем истечение вязких жидкостей через капилляры:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} (P_1 - P_2), \quad (7.27)$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости;  $d$  и  $l$  – внутренний диаметр и длина капилляра;  $P_1$  и  $P_2$  – давление до и после капилляра.

Отсюда, при условии  $Q = \text{const}$ , найдем

$$\mu = \frac{\pi d^4}{128 Q l} (P_1 - P_2) = k(P_1 - P_2). \quad (7.28)$$

Между динамической вязкостью и перепадом давления на капилляре имеет место линейная связь.

Анализируемая жидкость (рис. 7.25) с помощью шестеренчатого насоса 1, обеспечивающего постоянный расход  $Q$ , прокачивается через змеевик 2, где нагревается до температуры масла, заполняющего термостат 4, и капилляр 3. Перепад давления на капилляре измеряется дифференциальным манометром 5 с пневматическим или электрическим преобразователем. Класс точности –  $1,5 \div 2,5$ .

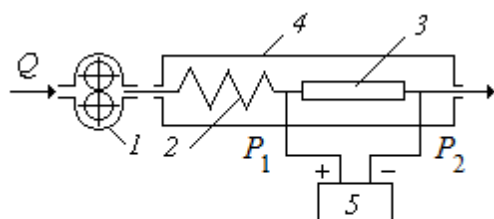


Рис. 7.25. Схема капиллярного вискозиметра

Измерительные комплекты капиллярных вискозиметров содержат первичный преобразователь ПП, дифференциальный манометр ДМ с пневматическим (см. рис. 7.26, а) или электрическим (см. рис. 7.26, б) преобразователем ППР и вторичный прибор ПВ.

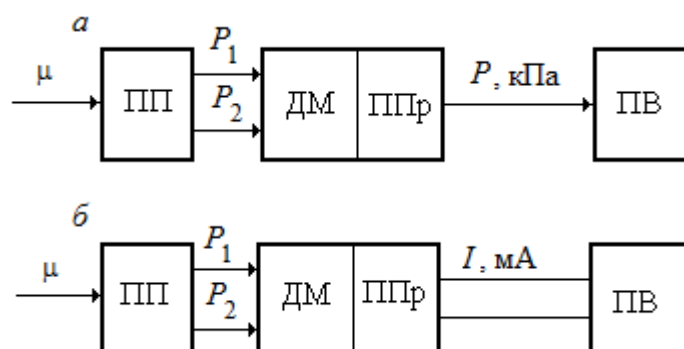


Рис. 7.26. Измерительные комплекты капиллярных вискозиметров

Действие **вискозиметров с падающим шариком** основано на измерении времени падения шарика в анализируемой жидкости под действием силы тяжести и силы трения шарика об анализируемую жидкость. Это движение описывается законом Стокса:

$$v = \frac{2g(\rho_{\text{ш}} - \rho)r^2}{9\mu} = k / \mu, \quad (7.29)$$

где  $v$  – скорость падения шарика;  $\rho_{\text{ш}}$  и  $\rho$  – плотность материала шарика и анализируемой жидкости;  $r$  – радиус шарика;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Из закона Стокса следует, что, при постоянной плотности  $\rho$  анали-

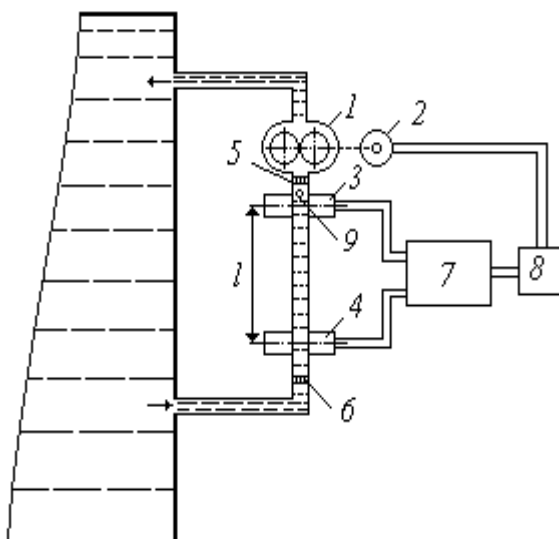


Рис. 7.27. Схема вискозиметра с падающим шариком

зируемой жидкости, между скоростью падения шарика и динамической вязкостью имеет место однозначная обратная зависимость.

В вискозиметрах с падающим шариком измеряется не скорость падения шарика, а время  $\tau$ , за которое он проходит путь  $l$ :

$$\tau = l / v = l\mu / k = k_1\mu, \quad (7.30)$$

где  $k_1$  – постоянный коэффициент.

Шестеренчатый насос 1 (см. рис. 7.27) прокачивает анализируемую жидкость по трубопроводу из немагнитного материала вверх. Вместе с жидкостью под-

нимается шарик 9 до сетки 5. В этот момент выключится двигатель 2, управляемый блоком 8, и шарик начинает свободно падать. Два дифференциально-трансформаторных датчика 3 и 4 формируют импульсы напряжения при прохождении шариком отметок, которые позволяют преобразователю 7 вычислить время  $\tau$  прохождения пути  $l$  и величину динамической вязкости  $\mu$ . Шарик опускается до сетки 6. Блок управления включает двигатель насоса и цикл повторяется. Класс точности – 2,0.

Принцип действия **ротационных вискозиметров** основан на измерении крутящего момента, возникающего на оси тела вращения, помещенного в анализируемую среду. Этот момент определяется по выражению

$$M = k\omega\mu, \quad (7.31)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции тела вращения;  $\omega$  – угловая скорость вращения. При постоянной скорости вращения динамическая вязкость однозначно определяется по моменту  $M$ .

В ротационных вискозиметрах используются различные конструкции тел вращения. Некоторые из них приведены на рис. 7.28.

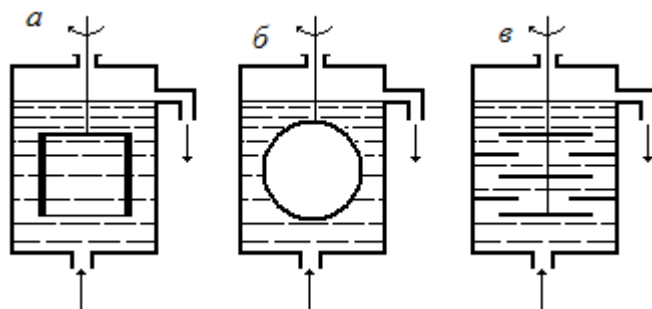


Рис. 7.28. Схемы ротационных вискозиметров

В качестве тела вращения используется цилиндр (рис. 7.28, *а*), шар (рис. 7.28, *б*) или диски, закрепленные на валу (рис. 7.28, *в*). Диски вращаются между шайбами, закрепленными на стенках сосуда. Наибольшее распространение получили вискозиметры с коаксиальными цилиндрами (см. рис. 7.29).

Момент вращения создается диском 2 (см. рис. 7.29, *а*) или цилиндром 2 (см. рис. 7.29, *б*), вращательное движение которым сообщает синхронный двигатель 9. На диске 3 (цилиндре 3) возникает момент вращения, передаваемый анализируемой жидкостью. Этот момент с помощью вала 4 передается на шкив 5 и через шкив 6 передается на пружину 7, которая компенсирует развиваемое усилие, пропорциональное динамической вязкости анализируемой среды. Преобразователь 10 преобразует это усилие в унифицированный пневматический или электрический сигнал. Класс точности – 1,0–2,5.

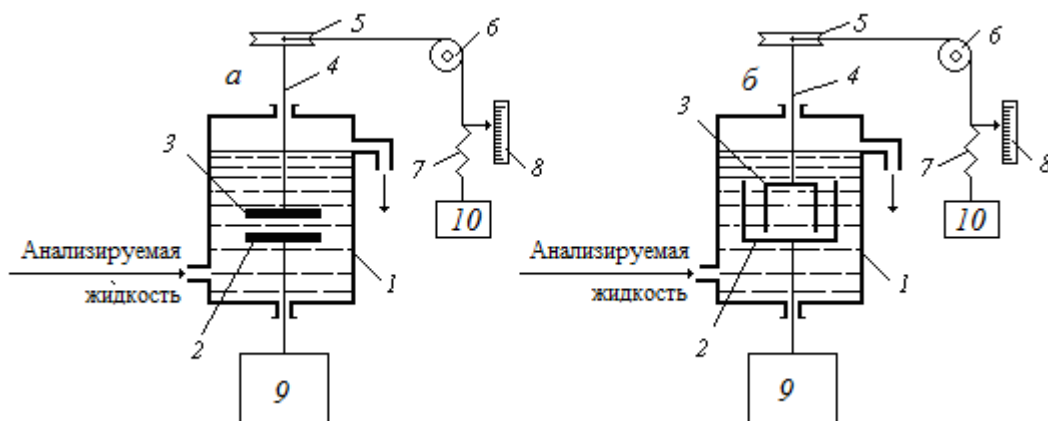


Рис. 7.29. Схемы коаксиальных вискозиметров

Измерительные комплекты коаксиальных вискозиметров содержат первичный преобразователь ПП, преобразующий значение динамической вязкости в усилие  $F$ , которое промежуточным преобразователем ППр типа «усилие – давление» или «усилие – ток» преобразуется в унифицированный сигнал давление или ток, измеряемые прибором вторичным ПВ (рис. 7.30).

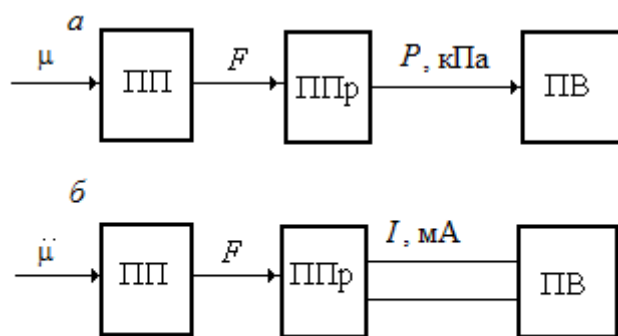


Рис. 7.30. Измерительные комплексы коаксиальных вискозиметров

## 7.10. Измерение влажности газов и сыпучих материалов

Под **влажностью** газа или сыпучего материала понимают содержание влаги в единице объема. Основная единица измерения **абсолютной влажности** – килограмм на метр кубический ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Под **относительной влажностью** понимают отношение массы водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  газа, к максимально возможной массе водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  того же газа при той же температуре и давлении. Единица измерения относительной влажности – %.

Автоматическое измерение влажности газов производится психрометрическим методом, методом точки росы и сорбционным методом.

**Автоматические психрометры** для измерения влажности газа используют психрометрический эффект: при испарении влаги с увлажненной поверхности термометра (влажный термометр) температура его снижается. Между «сухим» и «влажным» термометром создается разность температур, называемая **психрометрической разностью**.

Зависимость относительной влажности  $\varphi$  (%) от психрометрической разности имеет вид

$$\varphi = \frac{P_{\text{в}} - A(t_{\text{с}} - t_{\text{в}})}{P_{\text{с}}} 100, \quad (7.32)$$

где  $P_{\text{в}}$  – давление паров, насыщающих анализируемую газовую смесь при температуре «влажного» термометра  $t_{\text{в}}$ ;  $P_{\text{с}}$  – давление паров, насыщающих анализируемую газовую смесь при температуре «сухого» термометра  $t_{\text{с}}$ ;  $A$  – психрометрический коэффициент, зависящий от конструкции психрометра, скорости обдувания влажного термометра газом и давления газа.

Измерительная схема автоматического психрометра построена на

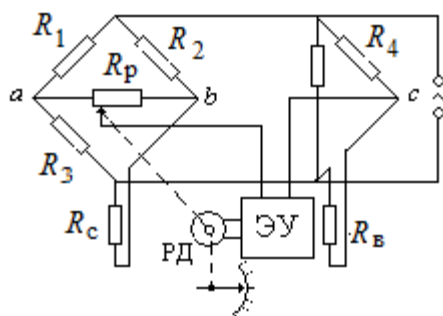


Рис. 7.31. Схема автоматического психрометра

базе двух неуравновешенных мостов (рис. 7.31). Один мост образован резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ ; в измерительную диагональ  $ab$  включен реохорд  $R_p$ . Другой мост образован резисторами  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_{\text{в}}$ . Таким образом, разность потенциалов на вершинах  $a$  и  $b$  пропорциональна температу-

ре «сухого» термометра сопротивления, а разность потенциалов на вершинах  $a$  и  $c$  пропорциональна температуре «влажного» термометра сопротивления. Мосты включены встречно. В связи с этим падение напряжения между вершинами  $b$  и  $c$  пропорционально разности температур «сухого» и «влажного» термометров. Напряжение небаланса компенсируется частью падения напряжения на реохорде  $R_p$ , поэтому каждому положению движка реохорда  $R_p$  в состоянии равновесия будет соответствовать определенная психрометрическая разность. При изменении влажности анализируемой среды на входе электронного усилителя появится напряжение небаланса, электронный усилитель ЭУ включит реверсивный двигатель РД, выходной вал которого переместит движок реохорда  $R_p$  до состояния равновесия. Одновременно перемещается стрелка вторичного прибора. Основная абсолютная погрешность влагомера – 3 %.

При охлаждении анализируемого газа наступает насыщение паров влаги (**точка росы**). При постоянном давлении точка росы не зависит от температуры газа, а зависит только от влажности.

Полупроводниковая термоэлектрическая батарея 4 (рис. 7.32), работающая по принципу Пельтье, охлаждает зеркало 5 до появления на его поверхности конденсата. Отражательная способность зеркала резко ухудшится, поэтому световой поток, поступающий от лампы накаливания 1 через линзу 2 на фотоэлемент 8, уменьшится. Электронный блок 9 переключит поляризованное реле 10 и контакт 11 разомкнется, выключив питание термобатареи 4. Так как зеркало обдувается вентилятором 3, то конденсат на зеркале испаряется, отражательная способность зеркала восстанавливается и световой поток поступает на фотоэлемент 8. Электронный блок 9 переключит поляризованное реле 10 так, что контакт 11 замкнется. Включится питание термобатареи. Зеркало охлаждается. Цикл повторяется. Температура поверхности зеркала измеряется термопарой 6 и милливольтметром 7. Практически реализована следящая система, поддерживающая температуру зеркала равной температуре точки росы.

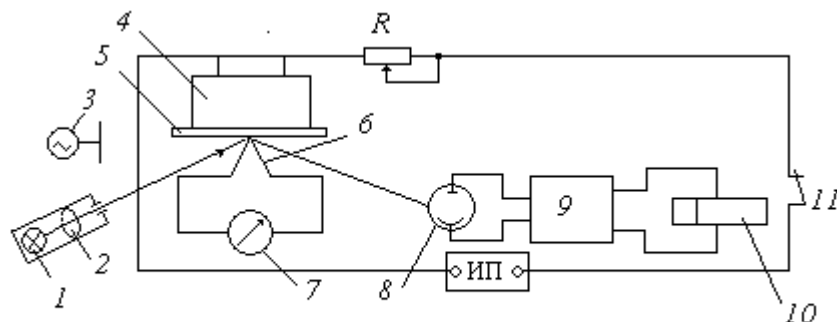


Рис. 7.32. Схема гигрометра точки росы

**Сорбционные методы** основаны на поглощении влаги из анализируемой газовой смеси каким-либо гигроскопическим веществом. При этом может меняться электрическая проводимость пленки; изменяется количество электричества, затрачиваемого на электролиз влаги; изменяется частота собственных колебаний кварцевого резонатора от массы вещества, нанесенного на поверхность кварцевой пластины; изменяется масса поглотителя влаги и т. д.

Для определения **влажности сыпучих материалов** используются прямые методы высушивания, экстракционные и химические. Эти методы неавтоматические, требующие длительного времени для анализа. Их используют в лабораторной практике.

Косвенные методы позволяют быстро определить влажность, но дают большую погрешность. Достоинство состоит в том, что эти методы позволяют автоматизировать процесс измерения влажности.

**Кондуктометрический метод** использует зависимость электрических свойств капиллярно-пористых материалов от влагосодержания. Электрическое сопротивление  $R_x$  таких материалов определяется по выражению

$$R_x = A/W^n, \quad (7.33)$$

где  $A$  – постоянная, зависящая от материала;  $W$  – влажность материала в % по массе;  $n$  – показатель степени, зависящий от структуры и природы материала.

Кондуктометрический метод пригоден для создания сигнализаторов и индикаторов, не обеспечивающих высокую точность измерения. Электрическое сопротивление материала измеряется с помощью мостовых схем.

**Диэлькометрический метод** основан на зависимости электрической емкости преобразователя, выполненного в виде двух пластин или двух соосных цилиндров и заполненного анализируемым материалом, от влажности. Измерительные схемы строятся на основе неуравновешенных мостов.

## 8. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

### 8.1. Основные понятия и определения

Многие задачи управления технологическими процессами (рис. В.1) можно решить путем стабилизации технологических параметров объекта относительно их заданных значений, то есть реализовать частный случай автоматического управления, получившего название **регулирование**.

**Регулированием называют поддержание выходных параметров объекта относительно их заданных значений, постоянных или переменных, путем изменения подачи регулирующих воздействий.** Если этот процесс осуществляется с помощью технических средств без участия человека, то он называется **автоматическим**.

**Под объектом регулирования понимают аппарат или совокупность аппаратов, в которых осуществляется регулируемый процесс.**

Если **объект** имеет один регулируемый параметр  $y$  и регулирующее воздействие  $x$ , то он называется **одномерным** (рис. 8.1, а). Если **объект** имеет несколько регулируемых параметров  $\bar{y}$  и регулирующих воздействий  $\bar{x}$ , то он называется **многомерным** (рис. 8.1, б). Если внутренние связи между регулируемыми параметрами отсутствуют или ими можно пренебречь, то такой объект называется **объектом с несвязанными параметрами**. Если внутренние связи между регулируемыми параметрами присутствуют, то такой объект называется **объектом со связанными параметрами**.

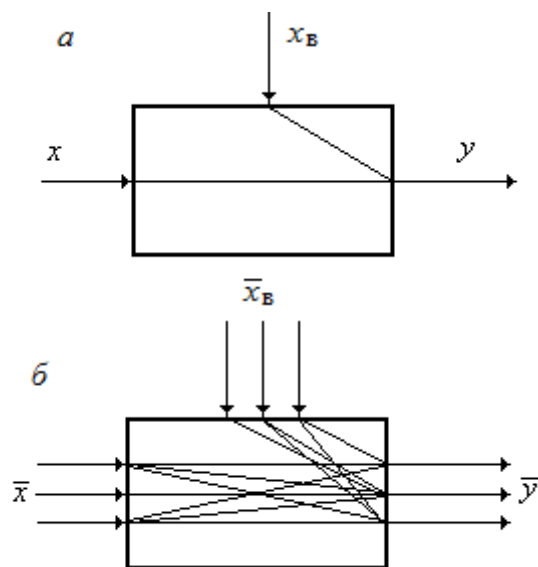


Рис. 8.1. Схемы объектов регулирования

Кроме **регулирующих воздействий  $x$**  (изменение расхода массы или энергии с помощью специальных исполнительных устройств – **регулирующих органов**), на объект действуют внутренние или внешние возмущения  $x_B$  (изменение температуры окружающей среды, изменение состава сырья, колебание давления и т. д.).

В качестве **средств получения информации** используются рассмотренные в предыдущих разделах измерительные приборы и преоб-



разователи (датчики), работающие в автоматическом режиме.

В соответствии с поставленной *перед автоматической системой регулирования (АСР)* задачей – обеспечить поддержание регулируемого параметра в некоторой малой окрестности относительно его заданного значения – вместо устройства управления используется *автоматический регулятор*.

Под действием внешних или внутренних возмущений изменяется значение *регулируемого параметра*  $y$  (рис. 8.2). *Датчик* (измерительный преобразователь) преобразует регулируемый параметр в унифицированный электрический или пневматический сигнал  $y$ , который поступает на вход *регулятора*. Здесь текущее значение  $y$  сравнивается с заданным значением  $y_{зд}$  и по определенному закону, реализуемому регулятором (*закон регулирования, или алгоритм*), преобразуется в *регулирующее воздействие*  $x_p$ , которое поступает на *исполнительный механизм*, перемещающий *регулирующий орган*. Последний изменяет расход массы или энергии в объект до тех пор, пока отклонение текущего значения регулируемого параметра не станет меньше некоторого заданного значения  $|y(\tau) - y_{зд}| \leq \Delta$ .

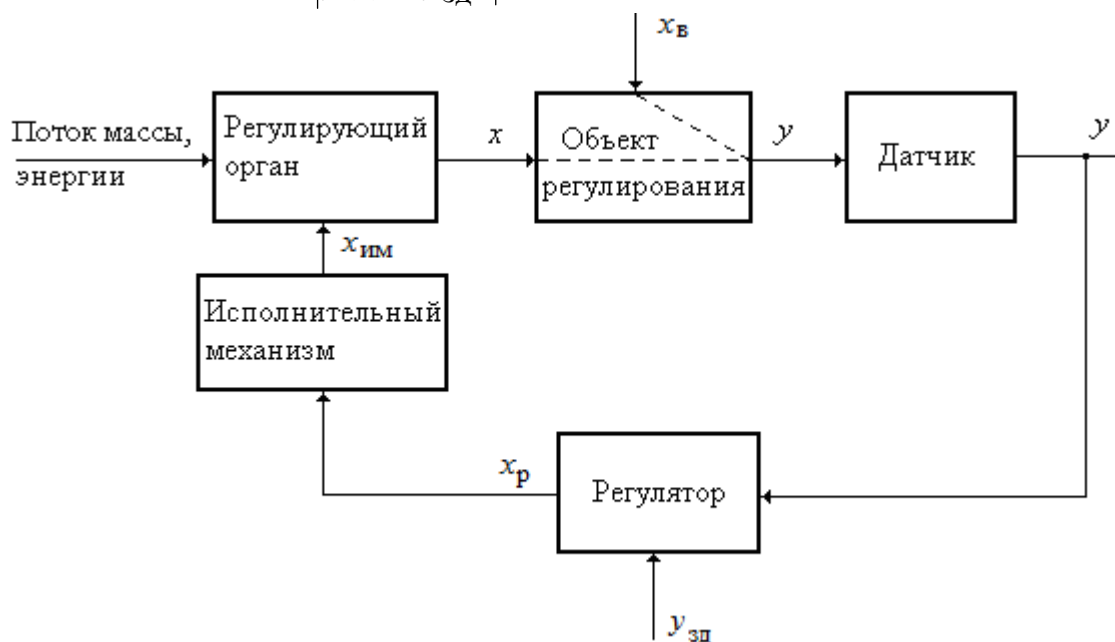


Рис. 8.2. Схема одноконтурной системы регулирования по отклонению

Таким образом, регулятор формирует регулирующее воздействие, постоянно оценивая результат работы системы по величине отклонения регулируемого параметра от заданного значения. Такой способ регулирования получил название *«регулирование по отклонению»*. Реализация способа возможна благодаря использованию *обратной связи*, которая обеспечивает передачу информации с выхода системы на вход и

создает замкнутый контур регулирования.

***Системы, работающие по принципу компенсации возмущения, не имеют замкнутого контура регулирования и поэтому не анализируют результат*** (рис. 8.3).



Рис. 8.3. Схема системы регулирования по возмущению

Датчик измеряет величину возмущающего воздействия и преобразует в унифицированный сигнал  $x_в$ , который поступает в регулятор, где сравнивается с номинальным значением  $x_n$ . Если отклонение текущего значения мало отличается от номинального  $|x_в(\tau) - x_n| \leq \Delta_в$ , то система находится в равновесии. Если отклонение превысит величину  $\Delta_в$ , то регулятор преобразует это отклонение по заданному закону в регулирующее воздействие  $x_p$ , исполнительный механизм с помощью регулирующего органа изменит поток массы или энергии в объект, чтобы компенсировать влияние возмущения на величину регулируемого параметра, не дожидаясь его изменения. Реализуется принцип опережения воздействия по отношению к реакции системы. В этом случае алгоритм регулятора с большой точностью должен учитывать статические и динамические свойства всей системы. Достичь этого в абсолютном большинстве случаев не удастся в связи со сложностью технологических процессов, поэтому используются комбинированные системы, сочетающие положительные свойства систем регулирования по отклонению и по возмущению (см. рис. 8.4).

Выбирается внешнее возмущающее воздействие, оказывающее наибольшее влияние на процесс, и строится система компенсации влияния этого возмущения на базе регулятора 2. Влияние остальных возмущений компенсируется АСР, работающей по принципу отклонения и реализованной на базе регулятора 1.

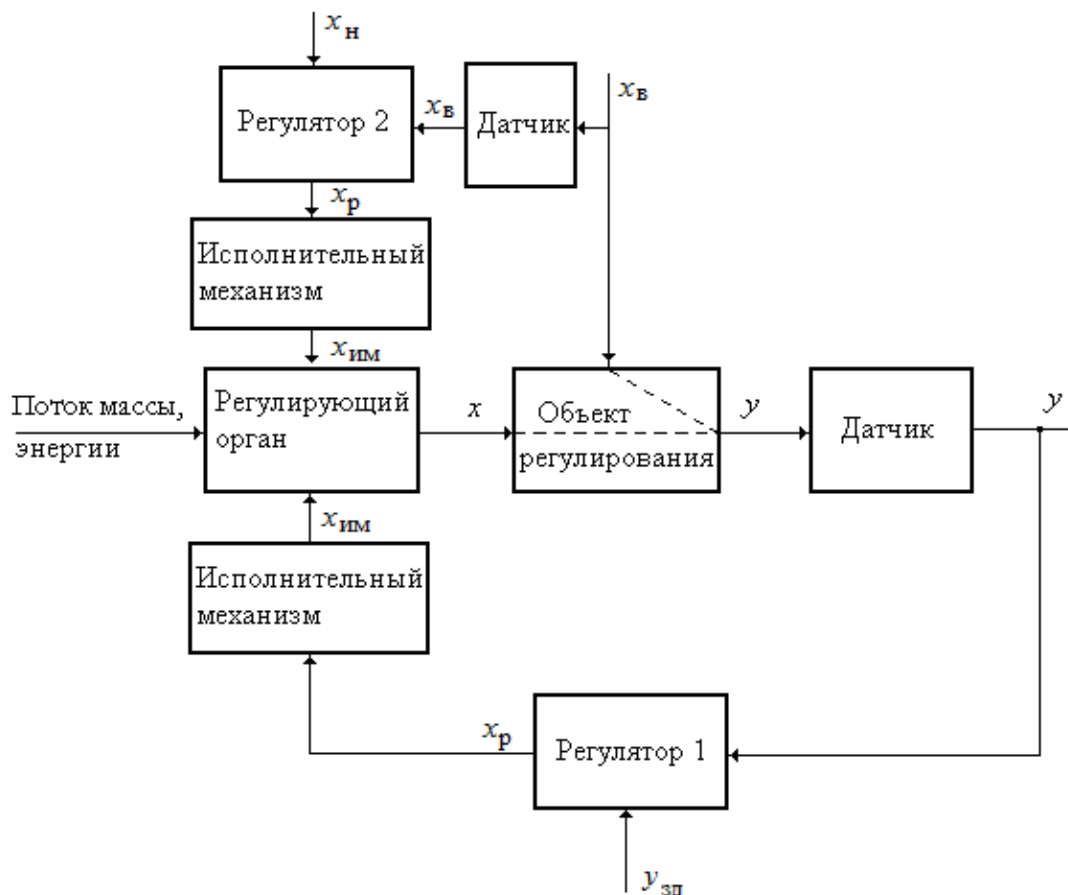


Рис. 8.4. Схема комбинированной системы регулирования

В зависимости от способа формирования заданного значения  $y_{зд}$  регулируемой величины АСР делятся на стабилизирующие, программные и следящие.

В стабилизирующей АСР задатчик формирует постоянное во времени значение  $y_{зд}(\tau) = \text{const}$ , **поэтому задача стабилизирующей АСР заключается в поддержании регулируемого параметра в некоторой малой окрестности относительно его заданного значения, остающегося постоянным длительное время.**

В АСР программного регулирования задатчик формирует задание по заранее определенной во времени программе  $y_{зд}(\tau) = f(\tau)$ , **поэтому задача программной АСР заключается в изменении регулируемого параметра в соответствии с заданной программой.**

В следящих АСР задание формируется в зависимости от изменения другого параметра –  $y_{зд} = f(y_1)$ , **поэтому задача следящей АСР заключается в изменении регулируемого параметра во времени в определенной зависимости от изменения другого параметра –  $y_1$ , то есть необходимо следить за изменением параметра  $y_1$  и воспроизводить регулируемый параметр в определенной зависимости от его изменения:**

$$y(\tau) = f[y_1(\tau)].$$

В **непрерывных** АСР непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует непрерывное изменение выходных величин всех элементов системы.

В **релейных** АСР имеется релейное звено, на выходе которого формируется два (или три) фиксированных значения сигнала при непрерывном изменении входного сигнала.

В **импульсных** АСР имеется импульсное звено, преобразующее непрерывный входной сигнал в последовательность импульсов, амплитуда или длительность которых пропорциональна входному сигналу.

АСР с **цифровыми вычислительными устройствами** работают в импульсном режиме, так как выходной сигнал вычислительного устройства представляет собой последовательность импульсов.

В зависимости от природы регулируемого параметра АСР делятся на АСР температуры, давления, расхода, уровня, концентрации и т. д.

## 8.2. Математическое описание АСР и их элементов

Для синтеза и анализа АСР используется аппарат алгебраических и дифференциальных уравнений.

В связи с тем, что АСР имеют в своем составе элементы различной природы, то их математическое описание строится в терминах той дисциплины, к которой относится процесс, происходящий в элементе. В химической и в других отраслях промышленности даже в отдельных элементах протекают процессы различной природы (гидродинамические, тепловые, массообменные, химические), поэтому аппарат алгебраических и дифференциальных уравнений является универсальным для математического моделирования процессов любой природы. Особенно это касается исследования процессов в АСР, где все элементы взаимосвязаны.

АСР могут находиться в равновесном (статическом) и неравновесном (динамическом) состоянии.

**Равновесное состояние характеризуется постоянством во времени всех параметров системы**, и её поведение определяется статической характеристикой:

$$y_0 = f(x_0), \quad (8.1)$$

где  $y_0$  и  $x_0$  — значения выходного и входного параметров системы в равновесном состоянии (рис. 8.5).

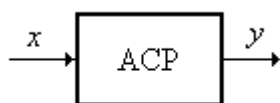


Рис. 8.5. Схема АСР

Обычно статические характеристики АСР и её элементов могут быть представлены в виде алгебраических уравнений и графиков (рис. 8.6).

**Если статическая характеристика сис-**

**темы или элемента линейная, то система или элемент называются линейными** (рис. 8.6, а).

Общий вид линейной статической характеристики можно представить в виде алгебраического уравнения

$$y_0 = a + kx_0, \quad (8.2)$$

где  $a$  – постоянная величина;  $k$  – коэффициент усиления.

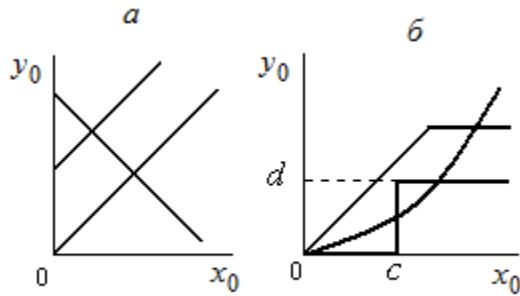


Рис. 8.6. Статические характеристики

**Если статическая характеристика системы или элемента нелинейная, то система или элемент называются нелинейными** (рис. 8.6, б), и её поведение определяется нелинейным алгебраическим уравнением. Например, уравнение статики релейного звена (рис. 8.6,

б) запишется в следующем виде:

$$y_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_0 \leq c; \\ d & \text{при } x_0 \geq c. \end{cases} \quad (8.3)$$

В **неравновесном режиме**, возникающем под действием возмущений и регулирующих воздействий, **поведение системы описывается уравнениями динамики**  $y(\tau) = f(x, \tau)$  или **динамическими характеристиками, которые определяют зависимость изменения выходной величины во времени от изменения входной величины**. Динамические характеристики АСР или элемента могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений, передаточных и переходных функций и в виде частотных характеристик.

Динамические характеристики линейных АСР описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$a_n \frac{d^n y}{d\tau^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{d\tau} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{d\tau^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{d\tau} + b_0 x, \quad (8.4)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$  – постоянные коэффициенты;  $\tau$  – время;  $n$  – порядок левой части уравнения;  $m$  – порядок правой части уравнения;  $y$  – изменение выходной величины;  $x$  – известное входное воздействие.

В соответствии с условием физической реализуемости систем порядок правой части уравнения не должен превышать порядок левой части, или  $m \leq n$ .

При  $x=0$  уравнение (8.4) преобразуется в однородное уравнение

$$a_n \frac{d^n y}{d\tau^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{d\tau} + a_0 y = 0, \quad (8.5)$$

которое описывает поведение системы после снятия входного воздействия, или **свободное движение системы**, поэтому уравнение (8.5) называют **уравнением свободного движения системы**.

Уравнение статики (8.2) можно получить из уравнения динамики (8.4), приравняв все производные нулю:

$$y_0 = \frac{b_0}{a_0} x_0 = kx_0. \quad (8.6)$$

Абсолютное количество реальных систем и элементов являются нелинейными, поэтому их динамические характеристики описываются **нелинейными дифференциальными уравнениями**, которые решаются чаще всего только численными методами. Во многих случаях можно нелинейное уравнение заменить приближенным линейным уравнением, полученным в результате **линеаризации нелинейного уравнения**. Возможность применения **процедуры линеаризации** нелинейных дифференциальных уравнений на основе понятия **малого отклонения параметра** была доказана еще Вышнеградским.

Если нелинейность системы возникает из-за нелинейности статической характеристики, то последнюю можно линеаризовать, используя разложение нелинейной функции в ряд Тейлора с последующим отбрасыванием нелинейных членов разложения и переходом от полных параметров к их отклонениям от стационарного состояния  $(y_0, x_0)$ . Нелинейная статическая характеристика должна относиться к классу непрерывно дифференцируемых функций.

Рассмотрим примеры построения математических моделей элементов АСР и линеаризации нелинейных статических характеристик.

Построение математических моделей элементов АСР базируется на использовании **закона сохранения в статике и динамике**.

В статике количество выходящего из элемента вещества или энергии (приток) равно количеству входящего вещества или энергии (сток):

$$Q_{\text{ст},0} = Q_{\text{пр},0}. \quad (8.7)$$

В динамике разница между количеством входящего в элемент вещества или энергии и количеством выходящего вещества или энергии идет на накопление вещества или энергии в элементе:

$$Q_{\text{пр}}(\tau)d\tau - Q_{\text{ст}}(\tau)d\tau = dQ(\tau), \quad (8.8)$$

или

$$Q_{\text{пр}}(\tau) - Q_{\text{ст}}(\tau) = \frac{dQ(\tau)}{d\tau}, \quad (8.9)$$

где  $dQ(\tau)/d\tau$  – скорость накопления вещества или энергии в элементе.

Перед построением математической модели, при необходимости, формулируются допущения. Это позволяет упростить исходную модель за счет исключения второстепенных факторов, мало влияющих на процесс.

**Пример 1.** Построить линейную математическую модель динамики сосуда со свободным сливом (рис. 8.7).

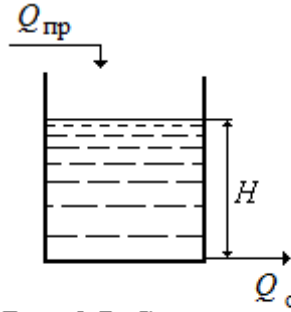


Рис. 8.7. Схема сосуда со свободным сливом

В сосуд, находящийся под атмосферным давлением, втекает жидкость  $Q_{\text{пр}}$  (входное воздействие). Под действием гидростатического давления столба жидкости  $H$  она вытекает ( $Q_{\text{ст}}$ ) через отверстие, находящееся на уровне дна сосуда. Регулируемый (выходной) параметр – уровень жидкости  $H$  в сосуде. Сделаем очевидное допущение: площадь поперечного сечения  $S$  сосуда постоянна по высоте. Тогда объем жидкости

$V = Q$ , находящейся в сосуде, можно выразить через регулируемый параметр

$$V = Q = SH. \quad (8.10)$$

В состоянии равновесия приток и сток жидкости равны:

$$Q_{\text{ст},0} = Q_{\text{пр},0}. \quad (8.11)$$

Для определения количества вытекающей жидкости воспользуемся формулой (5.7):

$$Q_{\text{ст},0} = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}, \quad (8.12)$$

где  $S_0$  – площадь сечения отверстия, через которое истекает жидкость;  $P_1 = H_0 \rho g$  – гидростатическое давление столба жидкости, соответствующее стационарному значению уровня жидкости  $H_0$ ;  $P_2 = 0$ , так как сосуд находится под атмосферным давлением.

Тогда выражение (8.12) примет вид

$$Q_{\text{ст},0} = \alpha S_0 \sqrt{2gH_0} = \beta \sqrt{H_0}, \quad (8.13)$$

где  $\beta = \alpha S_0 \sqrt{2g}$  – постоянный коэффициент.

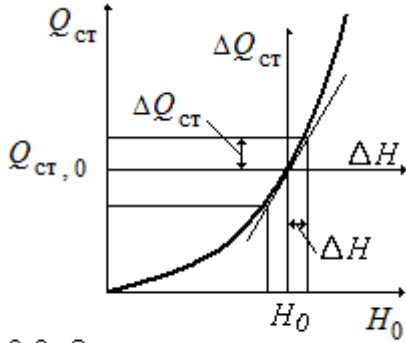


Рис. 8.8. Статическая характеристика сосуда со свободным сливом

Из выражения (8.13) следует, что сосуд со свободным сливом имеет нелинейную статическую характеристику (рис. 8.8). В неравновесном состоянии, в соответствии с уравнением (8.9), разность между притоком и стоком жидкости накапливается в сосуде. С учетом выражения (8.10) получаем

$$Q_{\text{пр}}(\tau) - Q_{\text{ст}}(\tau) = \frac{d(SH)}{d\tau}. \quad (8.14)$$

Учитывая, что  $Q_{\text{ст}}(\tau) = \beta\sqrt{H}$  и  $S(\tau) = \text{const}$ , после преобразования уравнения (8.14) получим дифференциальное уравнение динамики сосуда

$$S \frac{dH}{d\tau} + \beta\sqrt{H} = Q_{\text{пр}}. \quad (8.15)$$

Второе слагаемое входит в нелинейной форме, поэтому дифференциальное уравнение (8.15) является нелинейным.

Ранее была сформулирована задача АСР: поддерживать выходной параметр в некоторой малой окрестности относительно заданного значения с ошибкой, не превышающей  $\pm \Delta$ . Следовательно, необходимо иметь математическую модель, описывающую с достаточной точностью поведение системы в этой малой окрестности. И математическая модель должна быть линейной. Достигается это путем **линеаризации** нелинейных уравнений.

Пусть задана нелинейная,  $n$  раз дифференцируемая функция  $y = f(x)$ . Разложим эту функцию в ряд Тейлора относительно точки с координатами  $(y_0, x_0)$ :

$$y = y_0 + \frac{1}{1!} \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{x=x_0} (x - x_0)^2 + \dots \quad (8.16)$$

И, отбросив нелинейные члены разложения, получим

$$y \approx y_0 + \frac{1}{1!} \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x=x_0} (x - x_0). \quad (8.17)$$

Введя обозначения  $y - y_0 = \Delta y$  и  $x - x_0 = \Delta x$ , с учетом того, что



$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=x_0} = k$ , найдем линейное уравнение

$$\Delta y = k \Delta x, \quad (8.18)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент, характеризующий угол наклона касательной к оси  $x$ .

Линейное уравнение (8.18) записано в отклонениях параметров и с заданной точностью соответствует исходной нелинейной функции в достаточно малом интервале относительно точки разложения.

Теперь разложим нелинейную функцию  $Q_{\text{ст}}(\tau) = \beta\sqrt{H}$  в ряд Тейлора относительно точки с координатами  $(Q_{\text{ст},0}, H_0)$ , удерживая два первых члена разложения:

$$Q_{\text{ст}}(\tau) \approx \beta\sqrt{H_0} + \frac{\beta}{2\sqrt{H_0}}(H - H_0), \quad (8.19)$$

и подставим результат в уравнение (8.15):

$$S \frac{dH}{d\tau} + \beta\sqrt{H_0} + \frac{\beta}{2\sqrt{H_0}}(H - H_0) = Q_{\text{пр}}. \quad (8.20)$$

Так как  $\frac{d(H - H_0)}{d\tau} = \frac{dH}{d\tau}$  и  $\beta\sqrt{H_0} = Q_{\text{ст},0} = Q_{\text{пр},0}$ , получим

$$S \frac{d\Delta H}{d\tau} + \frac{\beta}{2\sqrt{H_0}} \Delta H = \Delta Q_{\text{пр}}. \quad (8.21)$$

В результате получено приближенное обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, решив которое можно выполнить анализ динамических свойств сосуда со свободным сливом при малых возмущениях. Его можно записать в стандартной форме

$$a_1 \frac{d\Delta y}{d\tau} + a_0 \Delta y = b_0 \Delta x, \quad (8.22)$$

где  $a_1 = S$ ;  $a_0 = \frac{\beta}{2\sqrt{H_0}}$ ;  $b_0 = 1$ .

**Пример 2.** Построить линейную математическую модель динамики теплообменника смешения (рис. 8.9).

Два потока жидкости с массовыми скоростями  $v_1$  и  $v_2$ , температурами  $t_1$  и  $t_2$  соответственно поступают в теплообменник смешения. Выходной поток

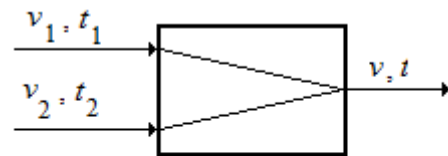


Рис. 8.9. Схема теплообменника смешения

жидкости  $v = v_1 + v_2$  нагревается до температуры  $t$ , которая является выходным параметром.

Сформулируем допущения: температура  $t$  выходного потока равна температуре жидкости в теплообменнике вследствие полного перемешивания; все потоки жидкости имеют теплоемкость  $c$ , и она остается постоянной в заданном интервале температур.

В состоянии равновесия количество тепла, вносимое потоками  $Q_{1,0}$  и  $Q_{2,0}$ , равно количеству тепла, уносимого выходным потоком  $Q_0$ :

$$Q_{1,0} + Q_{2,0} = Q_0, \quad (8.23)$$

или

$$v_{1,0}ct_{1,0} + v_{2,0}ct_{2,0} = (v_{1,0} + v_{2,0})ct_0. \quad (8.24)$$

Это – уравнение статической характеристики теплообменника.

В неравновесном состоянии часть тепла расходуется на нагревание (охлаждение) жидкости массой  $G$  в теплообменнике:

$$Q_1(\tau) + Q_2(\tau) - Q(\tau) = \frac{dQ_T(\tau)}{d\tau}, \quad (8.25)$$

или

$$v_1ct_1 + v_2ct_2 - (v_1 + v_2)ct = Gc \frac{dt}{d\tau}. \quad (8.26)$$

Выполним очевидные преобразования и получим дифференциальное уравнение динамики теплообменника смешения

$$G \frac{dt}{d\tau} + (v_1 + v_2)t = v_1t_1 + v_2t_2. \quad (8.27)$$

Это уравнение относится к классу нелинейных, так как содержит нелинейности типа произведения  $v \cdot t$ , и его необходимо линеаризовать.

Запишем переменные величины, используя понятие отклонения,  $v = v_0 + \Delta v$ ;  $t = t_0 + \Delta t$  и найдем произведение переменных:

$$vt = (v_0 + \Delta v)(t_0 + \Delta t) = v_0t_0 + v_0\Delta t + t_0\Delta v + \Delta v\Delta t. \quad (8.28)$$

Пренебрегая произведением отклонений  $\Delta v\Delta t$  как величиной второго порядка малости, получим приближенное линейное выражение

$$vt \approx v_0t_0 + v_0\Delta t + t_0\Delta v. \quad (8.29)$$

Заменим в уравнении (8.27) произведения параметров на их приближения типа (8.29) и учтем, что  $\frac{dt}{d\tau} = \frac{d(t_0 + \Delta t)}{d\tau} = \frac{d\Delta t}{d\tau}$ :

$$G \frac{d\Delta t}{d\tau} + (v_{1,0} + v_{2,0})t_0 + (v_{1,0} + v_{2,0})\Delta t + t_0\Delta v_1 + t_0\Delta v_2 = v_{1,0}t_{1,0} + v_{2,0}t_{2,0} + v_{1,0}\Delta t_1 + t_{1,0}\Delta v_1 + v_{2,0}\Delta t_2 + t_{2,0}\Delta v_2. \quad (8.30)$$

Из уравнения (8.30) вычтем уравнение (8.24):

$$G \frac{d\Delta t}{d\tau} + (v_{1,0} + v_{2,0})\Delta t = v_{1,0}\Delta t_1 + (t_{1,0} - t_0)\Delta v_1 + (t_{2,0} - t_0)\Delta v_2 + v_{2,0}\Delta t_2. \quad (8.31)$$

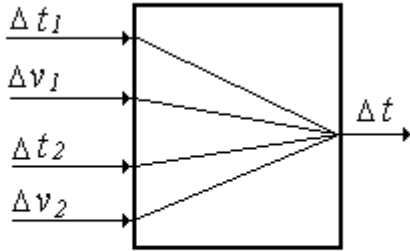


Рис. 8.10. Структурная схема теплообменника смешения

Это обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее изменение температуры потока на выходе теплообменника под действием входных параметров с заданной точностью относительно стационарного состояния.

Линейные системы обладают свойством **суперпозиции: реакция на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие**. Это свойство позволяет исследовать поведение систем под действием конкретного входного параметра, а остальные параметры обнуляются.

Уравнение (8.31) можно записать в стандартной форме:

$$a_1 \frac{dy}{d\tau} + a_0 y = b_{0,1}x_1 + b_{0,2}x_2 + b_{0,3}x_3 + b_{0,4}x_4. \quad (8.32)$$

Из анализа уравнения (8.32) следует, что теплообменник имеет четыре входных воздействия и один выходной параметр.

### 8.3. Преобразования Лапласа

Для решения обыкновенных дифференциальных уравнений в теории автоматического регулирования обычно используются преобразования Лапласа.

Преобразованием Лапласа называется соотношение

$$Y(p) = \int_0^{\infty} y(\tau) e^{-p\tau} d\tau, \quad (8.33)$$

ставящее функции вещественного переменного  $y(\tau)$  в соответствие функцию  $Y(p)$  комплексного переменного  $p = \alpha + i\omega$ . Функцию вещественного переменного  $y(\tau)$  называют **оригиналом**, а функцию ком-

плесного переменного  $Y(p)$  называют **изображением** по Лапласу. Преобразование, выполненное в соответствии с выражением (8.33), называют **прямым преобразованием** и используют символическую запись  $Y(p) = L\{y(\tau)\}$ .

Для нахождения оригинала по известному изображению применяется **операция обратного преобразования Лапласа** по соотношению

$$y(\tau) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha_0 - i\infty}^{\alpha_0 + i\infty} Y(p) e^{p\tau} dp. \quad (8.34)$$

Часто используется символическая запись  $y(\tau) = L^{-1}\{Y(p)\}$ .

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием преобразования Лапласа производится в три этапа:

1. К дифференциальному уравнению применяется операция прямого преобразования.
2. Находится решение уравнения в операторной форме.
3. К решению уравнения в операторной форме применяется операция обратного преобразования и находится оригинал функции.

Выполнение этих операций значительно упрощается, если применить **основные свойства преобразования Лапласа**:

1. Свойство линейности – изображение суммы слагаемых равно сумме изображений слагаемых, и константы можно выносить за знак преобразования:

$$L\{ay(\tau) + bx(\tau)\} = aL\{y(\tau)\} + bL\{x(\tau)\}.$$

2. Дифференцирование оригинала при нулевых начальных условиях:

$$L\left\{\frac{d^n y}{d\tau^n}\right\} = p^n Y(p).$$

3. Интегрирование оригинала:

$$L\left\{\int_0^\tau y(\tau) d\tau\right\} = \frac{Y(p)}{p}.$$

4. Теорема запаздывания:

$$L\{y(\tau - \tau_0)\} = e^{-p\tau_0}.$$

5. Теоремы о предельных значениях:

$$y(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} pY(p) \text{ при } p \rightarrow 0;$$

$$y(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} pY(p) \text{ при } p \rightarrow \infty.$$

6. Теорема разложения. Если  $Y(p) = \frac{B(p)}{A(p)}$  дробно-рациональная функция и степень полинома числителя меньше степени полинома знаменателя, то оригинал можно получить, используя выражения:

а) если все корни характеристического уравнения простые:

$$y(\tau) = \sum_{k=1}^n \frac{B(p_k)}{A'(p_k)} e^{p_k \tau},$$

где  $p_k$  – простые корни уравнения  $A(p) = 0$ ;  $A'(p_k) = \left\{ \frac{dA(p)}{dp} \right\}_{p=p_k}$ ;

б) если все корни характеристического уравнения простые, а один корень нулевой:

$$y(\tau) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{k=2}^n \frac{B(p_k)}{p_k A'(p_k)},$$

где  $p_1 = 0$ ; остальные корни уравнения  $A(p) = 0$  простые.

**Таблица соответствия.** Так как операция обратного преобразования Лапласа (8.34) для многих функций является сложной математической задачей, то составлена таблица соответствия, в которой приведены оригиналы и соответствующие им изображения.

Ниже приведены несколько примеров.

Таблица 8.1

Оригинал	Изображение
$1(\tau)$	$\frac{1}{p}$
$1'(\tau)$	$1$
$\tau$	$\frac{1}{p^2}$
$e^{-\alpha\tau}$	$\frac{1}{p + \alpha}$
$\frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha\tau})$	$\frac{1}{p(p + \alpha)}$
$\frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2}(e^{-\alpha_2\tau} - e^{-\alpha_1\tau})$	$\frac{1}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)}$
$\frac{1}{\alpha_1\alpha_2}(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}e^{-\alpha_1\tau} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2}e^{-\alpha_2\tau})$	$\frac{1}{p(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)}$

## 8.4. Передаточные и переходные функции

При решении задач анализа и синтеза линейных систем используются передаточные и переходные функции.

**Передаточной функцией системы** называется отношение изображения выходной величины к изображению входной величины:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (8.35)$$

Для получения выражения передаточной функции к дифференциальному уравнению применяют операцию прямого преобразования Лапласа.

Пусть динамические свойства системы описываются обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка

$$a_2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + a_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) = b_0 x(\tau). \quad (8.36)$$

Воспользуемся основными свойствами преобразования Лапласа и применим операцию прямого преобразования к уравнению (8.36) при нулевых начальных условиях:

$$a_2 p^2 Y(p) + a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = b_0 X(p).$$

В левой части уравнения выносим общий множитель  $Y(p)$ , и решаем уравнение относительно изображения выходного параметра:

$$Y(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} X(p). \quad (8.37)$$

В соответствии с приведенным выше определением записываем выражение для передаточной функции системы:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (8.38)$$

Частное решение дифференциального уравнения (8.36) возможно при задании входного воздействия  $x(\tau)$ . Обычно системы исследуют при подаче на вход **типового аperiodического воздействия**, в результате которого система переходит из одного равновесного состояния в другое.

**Процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое называется переходным.** Переходный процесс строится по переходной функции или временной характеристике.

**Импульсной переходной функцией  $w(\tau)$  называется реакция системы на единичное импульсное воздействие:**

$$x(\tau) = l'(\tau) = \begin{cases} \infty & \text{при } \tau = 0; \\ 0 & \text{при } \tau \neq 0. \end{cases}$$

Импульсную переходную функцию часто называют **весовой функцией**.

Используя таблицу соответствия (см. табл. 8.1, вторая строка), выполним операцию обратного преобразования уравнения (8.37) и найдем выражение импульсной переходной функции:

$$w(\tau) = L^{-1} \left\{ \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} 1 \right\} = \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p^2 + \frac{a_1}{a_2} p + \frac{a_0}{a_2}} \right\}. \quad (8.39)$$

Воспользуемся теоремой Виетта, таблицей соответствия (табл. 8.1, строка шестая) и запишем:

$$\begin{aligned} w(\tau) &= \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)} \right\} = \\ &= \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)} \right\} = \\ &= \frac{b_0}{a_2} \cdot \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} (e^{-\alpha_2 \tau} - e^{-\alpha_1 \tau}), \end{aligned} \quad (8.40)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – простые корни характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{a_1}{a_2} p + \frac{a_0}{a_2} = 0; \quad p_{1,2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4a_2^2} - \frac{a_0}{a_2}} = -\alpha \pm \beta; \quad p_1 = -\alpha_1; \quad p_2 = -\alpha_2.$$

Подставив числовые значения коэффициентов дифференциального уравнения системы (8.36) в решение (8.40) и задаваясь дискретными значениями времени  $\tau$ , можно построить график импульсной переходной функции  $w(\tau)$  (рис. 8.11).

**Переходной функцией  $h(\tau)$  называется реакция системы на единичное ступенчатое воздействие  $x(\tau) = l(\tau)$**  (рис. 8.12).

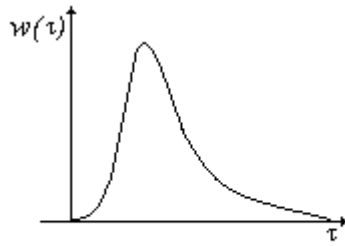


Рис. 8.11. График импульсной переходной функции

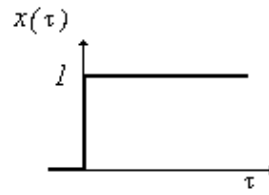


Рис. 8.12. Единичное ступенчатое воздействие

Используя таблицу соответствия (табл. 8.1, первая строка), выполним операцию обратного преобразования уравнения (8.37) и найдем выражение переходной функции:

$$h(\tau) = L^{-1} \left\{ \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \frac{1}{p} \right\} = \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p^2 + \frac{a_1}{a_2} p + \frac{a_0}{a_2}} \frac{1}{p} \right\}. \quad (8.41)$$

Воспользуемся теоремой Виетта, таблицей соответствия (табл. 8.1, строка седьмая) и запишем:

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)} \frac{1}{p} \right\} = \\ &= \frac{b_0}{a_2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)} \right\} = \\ &= \frac{b_0}{a_2} \frac{1}{\alpha_1 \alpha_2} \left( 1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_1 \tau} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_2 \tau} \right), \end{aligned} \quad (8.42)$$

где  $p_1 = -\alpha_1$  и  $p_2 = -\alpha_2$  – простые корни характеристического уравнения.

Так как произведение  $\alpha_1 \alpha_2 = \frac{a_0}{a_2}$ , то  $\frac{b_0}{a_2} \frac{1}{\alpha_1 \alpha_2} = \frac{b_0}{a_0}$ , и выражение

(8.42) примет окончательный вид

$$h(\tau) = \frac{b_0}{a_0} \left( 1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_1 \tau} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_2 \tau} \right). \quad (8.43)$$

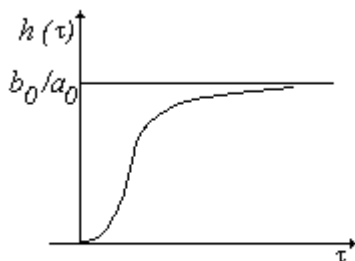


Рис. 8.13. График переходной функции

Подставив числовые значения коэффициентов дифференциального уравнения системы (8.36) в решение (8.43) и задаваясь дискретными значениями времени  $\tau$ , можно построить график пере-



ходной функции  $h(\tau)$  (рис. 8.13).

Реакции систем на единичное импульсное и единичное ступенчатое воздействие обычно называют **временными характеристиками**.

## 8.5. Соединение звеньев

Автоматические системы регулирования состоят из отдельных элементов, которые принято называть **звеньями**.

Существует три способа соединения звеньев: последовательное, параллельное и по принципу обратной связи.

При **последовательном соединении** выходная величина одного звена является входной величиной следующего звена (рис. 8.14, а):

$$Y_1(p) = W_1(p)X(p);$$

$$Y(p) = W_2(p)Y_1(p).$$

Избавившись от промежуточной переменной  $Y_1(p)$ , получим уравнение в операторной форме для последовательного соединения звеньев:

$$Y(p) = W_1(p)W_2(p)X(p).$$

Отсюда следует, что при последовательном соединении звеньев передаточная функция равна произведению передаточных функций звеньев:

$$W(p) = W_1(p)W_2(p). \quad (8.44)$$

Если последовательно соединено  $n$  звеньев, то в соответствии с выражением (8.44) получим

$$W_{\text{пс}}(p) = \prod_{k=1}^n W_k(p). \quad (8.45)$$

При **параллельном соединении** входная величина  $X(p)$  одновременно входит в оба звена, а выходные сигналы суммируются (рис. 8.14, б):

$$Y(p) = Y_1(p) + Y_2(p) = W_1(p)X(p) + W_2(p)X(p);$$

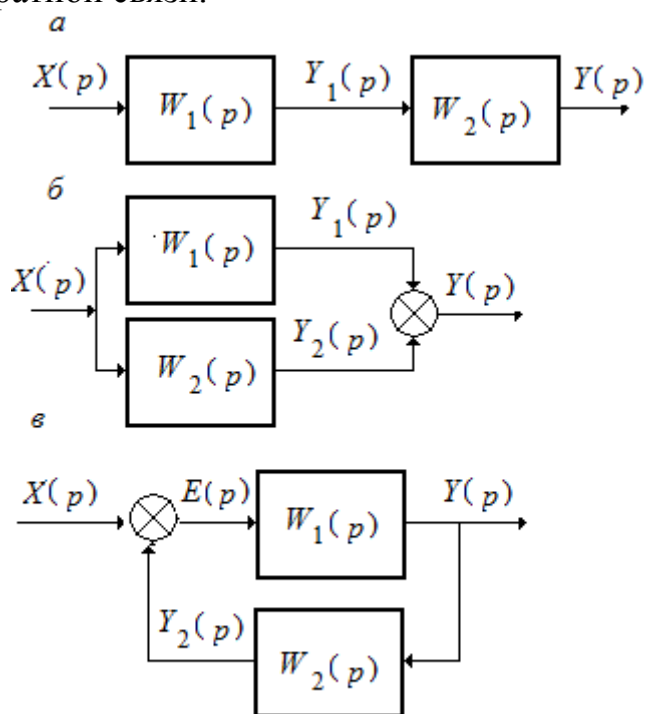


Рис. 8.14. Типовые соединения звеньев

$$Y(p) = (W_1(p) + W_2(p))X(p).$$

Отсюда следует, что передаточная функция равна сумме передаточных функций звеньев:

$$W_{\text{пр}}(p) = W_1(p) + W_2(p). \quad (8.46)$$

Если параллельно соединено  $n$  звеньев, то в соответствии с выражением (8.46) получим

$$W_{\text{пр}}(p) = \sum_{k=1}^n W_k(p). \quad (8.47)$$

При соединении звеньев **по принципу обратной связи** выходной сигнал одного из звеньев с помощью другого звена поступает обратно на его вход (см. рис. 8.14, в). Если эти сигналы складываются, то осуществляется **положительная обратная связь**. Если из входного сигнала первого звена вычитается выходной сигнал второго звена, то осуществляется **отрицательная обратная связь**:

$$E(p) = X(p) \pm Y_2(p); \quad Y(p) = W_1(p)E(p); \quad Y_2(p) = W_2(p)Y(p).$$

Исключая промежуточные параметры  $E(p)$  и  $Y_2(p)$ , получим

$$Y(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)} X(p). \quad (8.48)$$

Тогда передаточная функция соединения звеньев по принципу обратной связи имеет вид

$$W_{\text{ос}}(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)}. \quad (8.49)$$

При положительной обратной связи в знаменателе ставится знак «−», а при отрицательной обратной связи – знак «+».

## 8.6. Типовые звенья АСР

Автоматические системы регулирования состоят из элементов различной сложности. Многие из них могут быть разделены на более простые звенья. При этом звенья должны обладать детектирующими свойствами и их динамические свойства должны описываться простейшими алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Звенья, обладающие такими свойствами, принято называть **типовыми**. Они имеют определенные названия в соответствии с их функциональными свойствами. Любой элемент системы может быть представлен в виде комбинации типовых звеньев. Они легко технически реализуются, что позво-

ляет создавать устройства с заданными свойствами.

Свойства **усилительного** (безынерционного статического) звена описываются алгебраическим уравнением

$$y(\tau) = kx(\tau), \quad (8.50)$$

где  $k$  – коэффициент усиления (пропорциональности, передачи) звена.

Передаточная и переходная функции звена:

$$W(p) = k; \quad h(\tau) = k \cdot 1(\tau). \quad (8.51)$$

Пропорциональное звено изменяет входной сигнал по модулю в  $k$  раз.

Примеры усилительного звена: рычажные передачи, пружины, мембраны, сильфоны, усилители и т. д.

Свойства **интегрирующего** звена описываются уравнением

$$y(\tau) = k_{\text{и}} \int_0^{\tau} x(\tau) d\tau, \quad (8.52)$$

где  $k_{\text{и}}$  – коэффициент передачи, определяющий скорость интегрирования;  $k_{\text{и}} = \text{tg} \alpha$  (рис. 8.16).

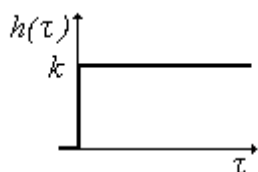


Рис. 8.15. График переходной функции усилительного звена

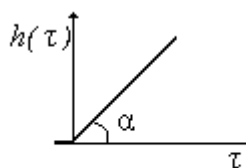


Рис. 8.16. График переходной функции интегрирующего звена

Передаточная и переходная функции звена:

$$W(p) = \frac{1}{p}; \quad h(\tau) = k_{\text{и}} \tau \cdot 1(\tau). \quad (8.53)$$

Выходная величина изменяется с постоянной скоростью пропорционально величине коэффициента  $k_{\text{и}}$ .

Примеры интегрирующего звена: сервоприводы гидравлические; сосуд, жидкость из которого откачивается насосом; интегральный регулятор и т. д.

Свойства **апериодического (инерционного)** звена первого порядка описываются обыкновенным дифференциальным уравнением

$$T \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = kx(\tau), \quad (8.54)$$

где  $T$  – постоянная времени, имеющая размерность времени.

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (8.55)$$

Переходную функцию звена можно получить, воспользовавшись таблицей соответствия (табл. 8.1, пятая строка):

$$h(\tau) = \frac{k}{T} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p + \frac{1}{T}} \cdot \frac{1}{p} \right\}.$$

Решая характеристическое уравнение  $p + \frac{1}{T} = 0$ , найдем корень

$p_1 = -\frac{1}{T}$ . Тогда переходная функция будет иметь вид

$$h(\tau) = k(1 - e^{-\tau/T}) \cdot 1(\tau). \quad (8.56)$$

Подставив в выражение (8.56) значения параметров, можно рассчитать ординаты переходного процесса для дискретных значений времени и построить график (рис. 8.17). Постоянная времени  $T$  определяет угол наклона касательной, проведенной из начала координат, а коэффициент пропорциональности  $k$  определяет установившееся значение выходного параметра при  $\tau \rightarrow \infty$ .

Уравнением апериодического звена первого порядка описываются элементы, имеющие одну ёмкость для накопления массы или энергии. К ним относятся ранее рассмотренные сосуд со свободным сливом и теплообменник смешения.

Свойства *идеального дифференцирующего* звена описываются уравнением

$$y(\tau) = k_d \frac{dx(\tau)}{d\tau}, \quad (8.57)$$

где  $k_d$  – коэффициент пропорциональности, называемый временем дифференцирования.

Передаточная и переходная функции звена:

$$W(p) = k_d p; \quad (8.58)$$

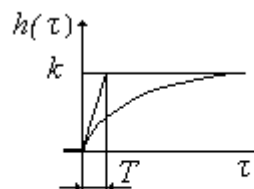


Рис. 8.17. График переходной функции апериодического звена

$$h(\tau) = k_d L^{-1} \left\{ p \cdot \frac{1}{p} \right\} = k_d L^{-1} \{1\} = k_d \cdot 1'(\tau). \quad (8.59)$$

Из выражения (8.57) следует, что выходная величина идеального дифференцирующего звена пропорциональна скорости изменения входного сигнала. Если на вход такого звена подать единичный ступенчатый сигнал  $1(\tau)$ , то за бесконечно малый промежуток времени выходная величина  $h(\tau) = k_d \cdot 1'(\tau)$  должна достигнуть бесконечности и вернуться к нулевому значению (8.59). Физически реализовать такое звено не представляется возможным, так как порядок правой части уравнения  $m = 1$  больше порядка левой части  $n = 0$ . Поэтому для выполнения операций дифференцирования сигналов используют **реальные дифференцирующие** звенья, свойства которых описываются уравнением

$$T \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = kT \frac{dx(\tau)}{d\tau}. \quad (8.60)$$

Передаточная функция звена имеет вид

$$W(p) = k \frac{Tp}{Tp + 1}. \quad (8.61)$$

Для получения выражения переходной функции запишем решение в операторной форме и применим к нему операцию обратного преобразования Лапласа:

$$h(\tau) = \frac{kT}{T} L^{-1} \left\{ \frac{p}{p + \frac{1}{T}} \cdot \frac{1}{p} \right\} = k L^{-1} \left\{ \frac{1}{p + \frac{1}{T}} \right\} = k e^{-\tau/T} \cdot 1(\tau). \quad (8.62)$$

Выходной сигнал (рис. 8.18) в момент  $\tau = 0$  увеличивается в  $k$  раз и плавно уменьшается до нуля. Для приближения свойств реального дифференцирующего звена к свойствам идеального звена необходимо одновременно увеличивать коэффициент передачи  $k$  и уменьшать постоянную времени  $T$  так, чтобы их произведение  $kT = k_d$  оставалось постоянным.

Реальные дифференцирующие звенья, выполненные из элементов аналоговой и цифровой техники, используются для выполнения операции дифференцирования медленно меняющихся процессов и создания корректирующих устройств в АСР.

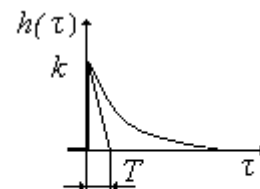


Рис. 8.18. График переходной функции реального дифференцирующего звена

Свойства *апериодических* и *колебательных звеньев второго порядка* описываются обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка

$$T_2^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = kx(\tau), \quad (8.63)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени.

Ранее было исследовано аналогичное уравнение (8.36). Чтобы не повторять все выводы, запишем выражение для передаточной функции, используя выражение (8.38). Произведем замену коэффициентов в уравнении (8.38) с учетом выражения (8.63):  $b_0 = k$ ;  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = T_1$ ;  $a_2 = T_2^2$ . Тогда

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{k}{T_2^2} \frac{1}{p^2 + \frac{T_1}{T_2^2} p + \frac{1}{T_2^2}} = \frac{k}{T_2^2} \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)},$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – корни характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{T_1}{T_2^2} p + \frac{1}{T_2^2} = 0, \quad (8.64)$$

которые определяются по известной формуле

$$p_{1,2} = -\frac{T_1}{2T_2^2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4T_2^4} - \frac{1}{T_2^2}}.$$

Значения коэффициентов дифференциального уравнения (8.63) определяют свойства и характер переходного процесса.

1. Если выполняется условие  $\frac{T_1^2}{4T_2^4} > \frac{1}{T_2^2}$ , или  $\frac{T_1}{T_2} > 2$ , то корни ха-

рактеристического уравнения будут простые:  $p_1 = -\alpha_1$ ;  $p_2 = -\alpha_2$ . Для этого случая ранее было получено уравнение переходной функции (8.43). Так как  $b_0 / a_0 = k$ , то для уравнения (8.63) переходная характеристика будет иметь вид

$$h(\tau) = k \left( 1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_1 \tau} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_2 \tau} \right) \cdot 1(\tau) \quad (8.65)$$

и график переходной функции будет иметь вид, приведенный на рис. 8.13. Переходная функция имеет апериодический характер, поэтому звено называется *апериодическим второго порядка*. Оно не отно-

сится к типовым звеньям, так как структурно, в соответствии с передаточной функцией, его можно представить в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев:

$$W_1(p) = \frac{1}{p - p_1} \quad \text{и} \quad W_2(p) = \frac{k}{p - p_2}.$$

2. Если выполняется условие  $\frac{T_1^2}{4T_2^2} < \frac{1}{T_2^2}$ , или  $\frac{T_1}{T_2} < 2$ , то корни ха-

рактеристического уравнения будут комплексными сопряженными:  $p_1 = -\alpha + i\omega$  и  $p_2 = -\alpha - i\omega$ . Для нахождения переходной функции воспользуемся таблицей соответствия (табл. 8.1, седьмая строка):

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \frac{k}{T_2^2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)} \frac{1}{p} \right\} = \\ &= \frac{k}{T_2^2} \left[ \frac{1}{p_1 p_2} + \frac{1}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 \tau} + \frac{1}{p_2(p_2 - p_1)} e^{p_2 \tau} \right] = \quad (8.66) \\ &= \frac{k}{T_2^2 p_1 p_2} \left[ 1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 \tau} + \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 \tau} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $p_1 p_2 = 1/T_2^2$ , подставляем выражения для комплексных сопряженных корней в выражение (8.66) и находим переходную функцию звена:

$$\begin{aligned} h(\tau) &= k \left[ 1 - e^{-\alpha \tau} \left( \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega \tau + \cos \omega \tau \right) \right] \cdot 1(\tau) = \\ &= k \left[ 1 - C e^{-\alpha \tau} \sin(\omega \tau + \varphi_0) \right] \cdot 1(\tau), \end{aligned} \quad (8.67)$$

где  $C = \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}}$ ;  $\varphi_0 = \arctg \frac{\omega}{\alpha}$ .

В связи с тем, что в выражении (8.67) содержатся периодические функции синус и косинус, то переходный процесс становится колебательным (рис. 8.19). Скорость затухания колебаний зависит от модуля вещественной составляющей  $\alpha$  корней характеристического уравнения (8.64), находящейся в показателе экспоненты.

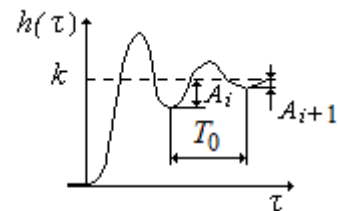


Рис. 8.19. График переходной функции колебательного звена

Колебательность переходного процесса обычно оценивают по **степени затухания**:

$$\psi = \frac{A_i - A_{i+1}}{A_i} = 1 - \frac{A_{i+1}}{A_i}. \quad (8.68)$$

Колебательность переходного процесса можно оценить и по **корневому показателю колебательности**  $m$ , равному модулю отношения вещественной части корней  $\alpha$  к мнимой части  $\omega$ :

$$m = \frac{\alpha}{\omega}. \quad (8.69)$$

Его можно выразить через коэффициенты дифференциального уравнения (8.63), подставив соответствующие выражения  $\alpha$  и  $\omega$ :

$$m = \frac{T_1 / (2T_2)}{\sqrt{1 - [T_1 / (2T_2)]^2}}. \quad (8.70)$$

Учитывая, что  $A_{i+1} = A_i e^{-\alpha T_0}$  и  $T_0 = 2\pi / \omega$ , получим выражение, связывающее степень затухания с корневым показателем колебательности,

$$\psi = 1 - \frac{A_i e^{-\alpha(2\pi/\omega)}}{A_i} = 1 - e^{-2\pi m}. \quad (8.71)$$

Приведем значения  $m$  и  $T_1 / T_2$ , соответствующие наиболее часто употребляемым значениям степени затухания:

$\psi$	0,7000	0,7500	0,8000	0,9000	0,9500
$m$	0,1916	0,2206	0,2562	0,3660	0,4768
$T_1 / T_2$	0,3704	0,4308	0,4964	0,6882	0,8608

С увеличением степени затухания процесса растет корневой показатель колебательности  $m$  и отношение постоянных времени  $T_1 / T_2$ .

3. Если выполняется условие  $\frac{T_1^2}{4T_2^4} = \frac{1}{T_2^2}$ , или  $\frac{T_1}{T_2} = 2$ , то характеристическое уравнение будет иметь кратные вещественные корни  $p_1 = p_2 = -\alpha$ .

Этому условию будет соответствовать переходная характеристика

$$h(\tau) = k \left\{ 1 - (1 + \alpha\tau) e^{-\alpha\tau} \right\} \cdot 1(\tau). \quad (8.72)$$

Переходный процесс будет аperiодический (см. рис. 8.13).



4. Если  $T_1 = 0$ , то динамические свойства звена будут описываться уравнением

$$T_2^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + y(\tau) = kx(\tau). \quad (8.73)$$

Характеристическое уравнение  $T_2^2 p^2 + 1 = 0$  будет иметь кратные чисто мнимые корни  $p_{1,2} = \pm i \frac{1}{T_2}$ . Этому условию будет соответствовать переходная характеристика

$$h(\tau) = \frac{k}{T_2^2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p^2 + \frac{1}{T_2^2}} \frac{1}{p} \right\} = k(1 - \cos \frac{\tau}{T_2}) \cdot 1(\tau). \quad (8.74)$$

Переходная характеристика звена содержит незатухающие колебания (рис. 8.20). Такое звено называется **консервативным**.

В качестве примера консервативного звена можно назвать центробежный маятник, используемый в качестве регулятора частоты вращения вала паровой машины, без демпфера.

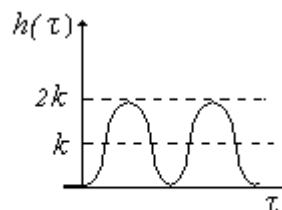


Рис. 8.20. График переходной функции консервативного звена

Свойства звена «чистого запаздывания» описываются уравнением

$$y(\tau) = x(\tau - \tau_0). \quad (8.75)$$

Передаточная функция —

$$W(p) = e^{-p\tau_0}. \quad (8.76)$$

Переходная функция —

$$h(\tau) = 1(\tau - \tau_0). \quad (8.77)$$

Звено «чистого запаздывания» не деформирует входной сигнал, а только задерживает его появление на выходе на величину времени запаздывания  $\tau_0$ .

Запаздывание в передаче сигнала возникает в связи с ограниченной скоростью прохождения сигнала через физиче-

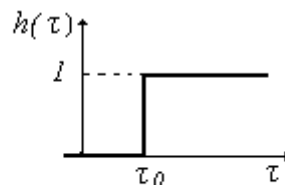


Рис. 8.21. График переходной функции звена «чистого запаздывания»

ские элементы. Примеры: трубопроводы, ленточные конвейеры и т. д.

## 8.7. Технологические объекты регулирования

Объектами регулирования в химической промышленности являются теплообменники, сосуды, емкости, ректификационные и абсорбционные колонны, реакторы, печи и т. д. Прежде чем строить систему регулирования, необходимо изучить статические и динамические характеристики объекта. Для этого используются математические модели, основные правила построения которых рассмотрены выше (разд. 8.2). В случае сложного объекта используется принцип декомпозиции: объект регулирования разбивается на простейшие одноёмкостные элементы; строятся математические модели этих элементов; используя структурные методы, строится модель объекта в виде дифференциального уравнения, системы дифференциальных уравнений, передаточной функции. Широкое распространение получили экспериментальные методы определения динамических характеристик.

При всем разнообразии технологических процессов и их аппаратного оформления имеются общие признаки, позволяющие проводить классификацию объектов регулирования.

Ранее были рассмотрены *одномерные и многомерные* объекты. Последние делятся на объекты с *несвязанными* и с *взаимосвязанными* параметрами. Примером многомерного объекта с взаимосвязанными параметрами может служить ректификационная колонна. При изменении расхода греющего пара  $Q$  в кипятильник (рис. 8.22) изменится температура  $t$  в кубе. Это вызовет изменение уровня жидкости  $h$  в кубе из-за изменения скорости её испарения. При изменении расхода кубового продукта  $G$  изменится уровень жидкости  $h$  в кубе, что повлечет изменение температуры  $t$ . В качестве другого примера может служить экзотермический реактор идеального перемешивания, где расход хладагента и реагентов влияет на температуру в реакторе и состав продуктов реакции.

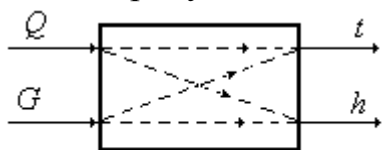


Рис. 8.22

Объекты с *сосредоточенными параметрами* обладают свойством иметь одинаковые значения регулируемой величины во всем объекте в данный момент времени (имеет место полное перемешивание среды), поэтому их динамические свойства описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Для упрощения расчетов начальные условия обычно принимаются нулевыми.

К объектам с сосредоточенными параметрами относятся реакторы идеального перемешивания, куб колонны, теплообменники смешения, сосуды и т. д.

У объектов с **распределенными параметрами** регулируемые величины имеют различные значения в данный момент времени в разных точках объекта (имеет место идеальное вытеснение среды), поэтому их динамические свойства описываются дифференциальными уравнениями с частными производными.

Для примера рассмотрим математические модели кожухотрубчатого теплообменника, обогреваемого насыщенным паром (рис. 8.23, а).

В кожухе имеет место идеальное перемешивание пара, а нагреваемая среда движется в режиме идеального вытеснения. Если тепловой ёмкостью металла труб и кожуха пренебречь, то математическая модель динамики теплообменника может быть представлена в виде одного уравнения типа

$$\rho_1 s_1 C_{p1} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = -v \rho_1 C_{p1} \frac{\partial t_1}{\partial l} + \frac{F}{L} K_T (t_2 - t_1), \quad (8.78)$$

где  $\rho_1$  и  $C_{p1}$  – плотность и удельная теплоемкость нагреваемой среды;  $F$  – поверхность теплообмена;  $s_1$  – площадь поперечного сечения потока;  $L$  – длина зоны идеального вытеснения;  $l$  – пространственная координата, изменяющаяся от 0 до  $L$ ;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи;  $v$  – объемная скорость потока идеального вытеснения;  $t_1 = t_1(l, \tau)$  – функция распределения температуры по пространственной координате;  $t_2$  – температура греющего пара.

Если тепловой ёмкостью металла труб нельзя пренебречь, то математическая модель динамики теплообменника может быть представлена системой из двух уравнений, записанных для стенки (8.79) и потока нагреваемой среды (8.80):

$$G_3 C_3 \frac{\partial t_3}{\partial \tau} = F_1 \alpha_1 (t_2 - t_3) - F_2 \alpha_2 (t_3 - t_1); \quad (8.79)$$

$$\rho_1 s_1 C_{p1} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = -v \rho_1 C_{p1} \frac{\partial t_1}{\partial l} + \frac{F_2}{L} \alpha_2 (t_3 - t_1), \quad (8.80)$$

где  $G_3$  и  $C_3$  – вес и удельная теплоемкость металла труб;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи;  $F_1$  и  $F_2$  – поверхности теплообмена;  $t_3$  –

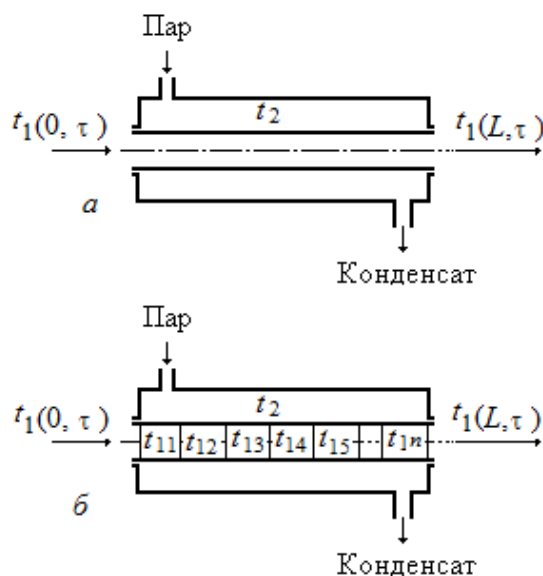


Рис. 8.23. Схема кожухотрубчатого теплообменника

температура металла труб.

В связи с трудностями решения таких уравнений объекты с распределенными параметрами заменяются последовательно соединенными ячейками идеального перемешивания, и получается **ячеечная модель** (см. рис. 8.23, б).

Примерами объектов с распределенными параметрами являются кожухотрубчатые теплообменники, трубчатые реакторы, трубчатые печи, ректификационные и абсорбционные колонны и т. д.

Свойство объекта самостоятельно возвращаться в равновесное состояние после снятия возмущения называют **самовыравниванием**. Например, при ступенчатом воздействии выходная величина возвращается в равновесное состояние благодаря наличию внутренней отрицательной обратной связи.

**Степень самовыравнивания** количественно оценивает свойство самовыравнивания и находится из отношения величины ступенчатого воздействия к вызванному этим воздействием отклонению выходной величины в равновесном состоянии:

$$\rho = \frac{x \cdot l(\tau)}{y(\infty)}, \quad \text{или} \quad \rho = \frac{x_{\text{в}} \cdot l(\tau)}{y(\infty)}. \quad (8.81)$$

Степень влияния входной величины на скорость изменения выходной величины оценивают по величине, называемой **ёмкостью объекта**. Под ёмкостью объекта понимают отношение входной величины к скорости изменения его выходной величины:

$$c = \frac{x}{dy/d\tau}. \quad (8.82)$$

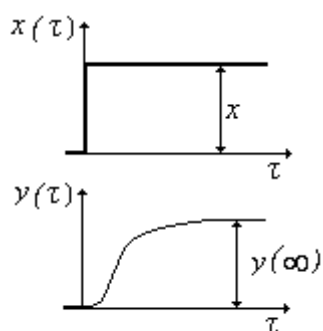


Рис. 8.24

Чем больше ёмкость объекта, тем меньше скорость изменения выходной величины.

При прохождении сигнала через объект выходная величина начинает изменяться с некоторым отставанием от времени изменения входного сигнала. Это связано с ограниченной скоростью распространения потоков массы и тепла в объекте. Такие объекты обладают **запаздыванием**. Запаздывание оценивается величиной, называемой **временем запаздывания**,  $\tau_0 = l/v$ , где  $l$  и  $\tau_0$  – путь и время прохождения сигнала через объект;  $v$  – скорость распространения сигнала в объекте.

Реакция **нейтрального (астатического) объекта** на ступенчатое воздействие стремится к бесконечности с постоянной скоростью. Такие объекты не обладают свойством самовыравнивания, так как в них от-

существуют внутренние отрицательные обратные связи. В качестве примера нейтрального объекта рассмотрим сосуд, из которого жидкость откачивается насосом с постоянной производительностью  $Q_{ст} = \text{const}$  (рис. 8.25).

Ранее (разд. 8.2) было получено уравнение динамики сосуда со свободным сливом (8.14). Так как  $Q_{ст}(\tau) = Q_{ст,0} = \text{const}$ , то уравнение динамики будет иметь вид

$$S \frac{dH(\tau)}{d\tau} + Q_{ст,0} = Q_{пр}(\tau). \quad (8.83)$$

Учитывая, что  $Q_{пр,0} = Q_{ст,0}$  и  $Q_{пр}(\tau) - Q_{ст,0} = \Delta Q_{пр}(\tau)$ , получим

$$S \frac{d\Delta H(\tau)}{d\tau} = \Delta Q_{пр}(\tau). \quad (8.84)$$

Проинтегрируем уравнение (8.84):

$$\Delta H(\tau) = \frac{1}{S} \int_0^{\tau} \Delta Q_{пр}(\tau) d\tau. \quad (8.85)$$

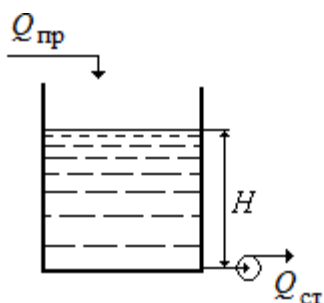


Рис. 8.25. Схема сосуда с постоянным отводом жидкости

Теперь можно сделать очевидный вывод: по динамическим свойствам рассматриваемый объект аналогичен

интегрирующему звену (8.52), выходная величина которого устремляется в бесконечность при  $\tau \rightarrow \infty$  с постоянной скоростью (см. рис. 8.16). Следовательно, это нейтральный объект регулирования.

Реакция **устойчивого (статического) объекта** на ступенчатое воздействие стремится к новому равновесному состоянию. Такие объекты обладают свойством самовыравнивания, так как в них имеется внутренняя отрицательная обратная связь.

В рассмотренных ранее примерах (разд. 8.2) динамические свойства описывались уравнением

$$a_1 \frac{dy}{d\tau} + a_0 y = b_0 x. \quad (8.86)$$

Применим к этому уравнению операцию прямого преобразования Лапласа и получим решение в операторной форме:

$$Y(p) = \frac{1}{\frac{a_1}{a_0} p + 1} \frac{b_0}{a_0} X(p). \quad (8.87)$$

Уравнению (8.87) соответствует структурная схема, приведенная

на рис. 8.26. Здесь последовательно соединены усилительное звено с передаточной функцией  $W_1(p) = b_0/a_0$  и интегрирующее звено с передаточной функцией  $W_2(p) = \frac{1}{(a_1/a_0)p}$ , охваченное отрицательной обратной связью в виде усилительного звена  $W_{oc}(p) = k_{oc} = 1$ .

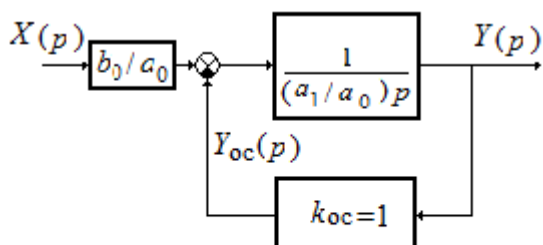


Рис. 8.26. Структурная схема устойчивого объекта первого порядка

В случае сосуда со свободным сливом обратная связь выражается влиянием величины стока жидкости на выходной сигнал – уровень жидкости.

График переходной функции устойчивых объектов аналогичен графику на рис. 8.13.

Реакция **неустойчивого объекта** на ступенчатое воздействие стремится к бесконечности с постоянно увеличивающейся скоростью за счет имеющейся внутренней положительной обратной связи (рис. 8.27).

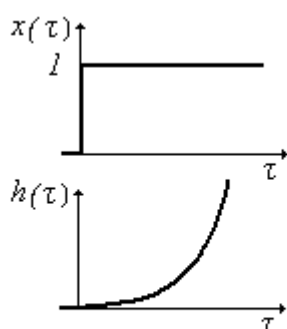


Рис. 8.27. График переходной функции неустойчивого объекта

Например, в реакторе идеального перемешивания, в котором протекает экзотермическая химическая реакция, при нарушении условия равновесия, когда тепло реакции будет превышать отводимое из реактора тепло, температура начинает повышаться, что приводит к возрастанию степени превращения реагентов. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему повышению температуры в реакторе с увеличивающейся скоростью.

Неустойчивые объекты не являются работоспособными, и их необходимо сделать устойчивыми. Для этого вводят дополнительно отрицательные обратные связи, компенсирующие влияние положительных обратных связей.

Многие реальные объекты можно представить как последовательное соединение простейших элементов: нейтральных, устойчивых, с запаздыванием. Тогда математическая модель может быть представлена дифференциальным уравнением высокого порядка с запаздывающим аргументом:

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + \dots + a_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) = b_0 x(\tau - \tau_0). \quad (8.88)$$

## 8.8. Экспериментальное определение динамических характеристик объектов

Ранее (разд. 8.2) были рассмотрены аналитические методы построения динамических моделей объектов и элементов АСР. Достоинство таких моделей состоит в том, что уже на стадии проектирования можно исследовать свойства объектов и создавать АСР с заданными свойствами. Для построения таких моделей необходимо априори знать механизмы процессов, происходящих в объекте, вплоть до численных значений коэффициентов, входящих в дифференциальные уравнения. Часто это не удается сделать ввиду неизученности кинетики химических процессов, процессов тепло- и массопереноса; отсутствия констант химических реакций и т. д. Ошибки в определении констант могут привести к неверным выводам при изучении объектов по таким моделям. Кроме того, погрешности математического моделирования возникают из-за некорректной формулировки допущений. Аналитическое исследование часто затрудняется из-за отсутствия надежных алгоритмов решения дифференциальных уравнений высоких порядков, и особенно дифференциальных уравнений с частными производными.

Построить математическую модель действующего объекта регулирования можно путем постановки специальных экспериментов. Объект оснащается специальной аппаратурой, строится план проведения эксперимента по интересующему каналу регулирования, рассчитываются форма и параметры возмущающих воздействий, обеспечивается стабилизация других внешних воздействий и проводится эксперимент. После обработки результатов эксперимента строится математическая модель объекта, обладающая требуемой точностью прогнозирования поведения данного объекта. На другие однотипные объекты эта модель не распространяется.

В зависимости от принятого типового воздействия на объекте снимаются кривые разгона, импульсные характеристики и частотные характеристики.

**Кривые разгона** снимаются при подаче на объект ступенчатого входного воздействия или близкого к ступенчатому воздействию в пределах допустимых по технологическому регламенту отклонений параметров. В равновесном состоянии объекта с пульта дистанционного управления подается сигнал на регулирующий орган для изменения входного потока массы или энергии и с помощью самопишущих приборов регистрируется изменение выходного параметра до момента установления нового равновесного состояния. Такие эксперименты могут проводиться несколько раз для того, чтобы исключить систематические ошибки и иметь возможность осуществления статистической обработки

результатов. После этого выполняется процедура аппроксимации кривых разгона решением дифференциального уравнения первого или второго порядка с чистым запаздыванием.

**Импульсные характеристики** снимаются при подаче на объект реального импульса с длительностью  $\Delta t$ . В равновесном состоянии с пульт дистанционного управления подается сигнал на регулирующий орган для изменения входного потока массы или энергии, через промежуток времени  $\Delta t$  регулирующий орган возвращается в исходное положение. С помощью самопишущих приборов регистрируется изменение выходного параметра до момента возвращения в исходное равновесное состояние, если объект устойчивый. Экспериментально снятая импульсная характеристика используется для построения модели объекта.

С помощью генератора **синусоидальных колебаний** на вход объекта подается периодический сигнал. Через некоторое время устанавливаются периодические колебания выходного параметра. Повторив эксперимент при различных частотах входного сигнала, получают семейство периодических колебаний выходного сигнала, обработка которых позволяет оценить динамические свойства объекта.

## 8.9. Автоматические регуляторы

Используя понятие передаточной функции и возможности метода структурных преобразований, построим упрощенную схему одноконтурной АСР, изображенной на рис. 8.2.

Пусть объект регулирования имеет передаточную функцию  $W_{об,1}(p)$ ; регулирующий орган –  $W_{ро}(p)$ ; датчик –  $W_{д}(p)$ ; исполнительный механизм –  $W_{им}(p)$ ; регулятор –  $W_{р,1}(p)$ . Для наглядности элемент сравнения вынесем из структуры регулятора. Тогда схему АСР (см. рис. 8.2) можно представить в виде, изображенном на рис. 8.28.

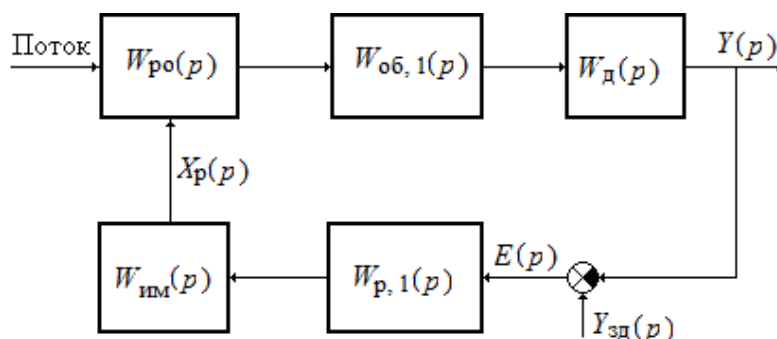


Рис. 8.28. Схема одноконтурной АСР

Регулирующий орган, объект и датчик (рис.8.28) соединены последовательно, поэтому их передаточные функции перемножаются:



$$W_{об}(p) = W_{ро}(p) \cdot W_{об,1}(p) \cdot W_d(p). \quad (8.89)$$

Регулятор и исполнительный механизм (рис. 8.28) также соединены последовательно, поэтому их передаточные функции перемножаются:

$$W_p(p) = W_{им}(p) \cdot W_{р,1}(p). \quad (8.90)$$

Такое объединение элементов используется при экспериментальном определении динамических свойств объекта и при формировании алгоритма регулятора. Теперь построим упрощенную схему одноконтурной системы, работающей по принципу отклонения (рис. 8.29).

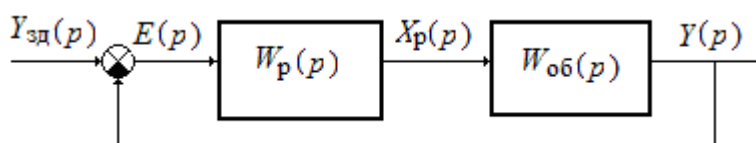


Рис. 8.29. Упрощенная система одноконтурной АСР

Текущее значение регулируемого параметра  $y$  в элементе сравнения сравнивается с заданным значением  $y_{зд}$ , и величина рассогласования  $\varepsilon = y_{зд} - y$  поступает на вход регулятора, где по определенному **алгоритму (закону регулирования)** преобразуется в регулирующее воздействие  $x_p = f(\varepsilon, \tau)$  так, чтобы в любой момент времени ошибка рассогласования не превышала определенного заданного значения  $|\varepsilon| \leq \Delta$ .

Закон регулирования можно формулировать в процессе синтеза АСР, а можно выбирать из типовых законов. Последний подход используется при синтезе АСР технологическими процессами в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, в энергетике, в промышленности строительных материалов и т. д. Для этого выпускаются регуляторы со структурно закрепленными типовыми законами регулирования.

Классификацию регуляторов можно выполнять по нескольким признакам.

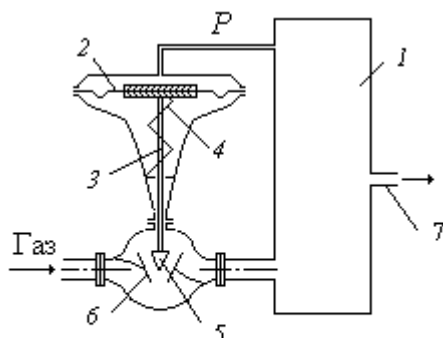


Рис. 8.30. Схема регулирования давления в газгольдере регулятором прямого действия

**По наличию подводимой энергии** регуляторы делятся на регуляторы **прямого и косвенного действия**.

**Регуляторы прямого действия перемещают регулирующий орган за счет энергии, развиваемой датчиком, то есть без подвода энергии от внешнего источника.**

На рис. 8.30 приведен пример регулирования давления газа в газгольдере с помощью мембранного регулятора

прямого действия. Давление в газгольдере 1 измеряется с помощью вялой мембраны 2. При этом на мембране развивается усилие  $F_m = S_{эф}P$ , где  $S_{эф}$  – эффективная поверхность мембраны. Под действием этого усилия жесткий центр мембраны перемещается вниз вместе со штоком 4 и золотником 5, что вызывает сжатие пружины, а также уменьшение проходного сечения клапана регулирующего и соответственное уменьшение расхода газа в газгольдере. Противодействующее усилие пружины  $F_{пр} = \delta_{пр} \cdot l$  за счет сжатия на величину  $l$  будет увеличиваться до состояния равновесия, когда  $F_{пр} = F_m$  и  $S_{эф}P = \delta_{пр} \cdot l$ , или  $P = (\delta_{пр} / S_{эф}) \cdot l$ . Из последнего выражения следует, что в состоянии равновесия каждому положению золотника 5 относительно седла 6 будет соответствовать определенное давление газа в газгольдере. По свойствам этот регулятор подобен пропорциональному звену. Заданное значение давления устанавливается за счет предварительного сжатия пружины 4. Основное возмущение – изменение потребления газа через штуцер 7. По аналогичному принципу работают регуляторы температуры, расхода и т. д.

Регуляторы прямого действия просты по устройству и надежны, но использовать их можно, когда к процессу регулирования не предъявляются высокие требования.

Регуляторы **непрямого действия** перемещают регулирующий орган за счет энергии, подводимой от внешнего источника. Они более сложны, выпускаются в виде встроенных устройств во вторичные приборы или в аппаратном исполнении, но позволяют добиваться высокого качества регулирования параметров. Ниже будут рассматриваться только регуляторы непрямого действия.

**По виду подводимой энергии** регуляторы делятся на электрические, пневматические и гидравлические. В электрических регуляторах используется электрическая энергия промышленной частоты; в пневматических – энергия сжатого воздуха давлением 140 кПа; в гидравлических – энергия жидкости под давлением 0,6–0,8 МПа.

**По виду регулируемой величины** различают регуляторы температуры, давления, расхода, уровня, концентрации и т. д. В связи с использованием унифицированных регулирующих блоков все регуляторы имеют одинаковую структуру.

**По характеру выходного сигнала** регуляторы делятся на дискретные и непрерывные.

Выходной сигнал дискретного регулятора при непрерывном изменении входного сигнала может принимать определенное число дискретных значений (**позиционные или релейные регуляторы**) или пред-

ставлять собой последовательность импульсов (**импульсные регуляторы**) с изменяющимися характеристиками – амплитуда импульса, ширина импульса. **Цифровые регуляторы** принято относить к многопозиционным регуляторам.

Выходной сигнал **непрерывного регулятора** изменяется по непрерывному закону.

По реализуемому закону регулирования непрерывные регуляторы делятся на **пропорциональные** (статические), **интегральные** (астатические), **пропорционально-дифференциальные**, **пропорционально-интегральные** и **пропорционально-интегрально-дифференциальные**.

**Пропорциональные регуляторы** (П-регуляторы) в динамическом отношении подобны усилительным звеньям, реализующим пропорциональный закон регулирования:

$$x_p(\tau) = k_p \varepsilon(\tau), \quad (8.91)$$

где  $k_p$  – коэффициент усиления регулятора – параметр настройки.

П-регуляторы перемещают регулирующий орган пропорционально отклонению регулируемого параметра от заданного значения (см. рис. 8.31).

Промышленные П-регуляторы реализуются по схеме с отрицательной обратной связью, охватывающей усилитель (см. рис. 8.32) с большим коэффициентом усиления. Такие системы называются **предельными**. Свойство предельной системы заключается в том, что её динамические свойства определяются свойствами обратной связи. Ниже это свойство будет использоваться неоднократно.

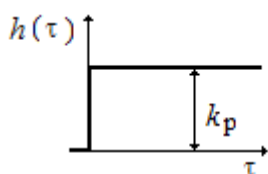


Рис. 8.31. График переходной функции П-регулятора

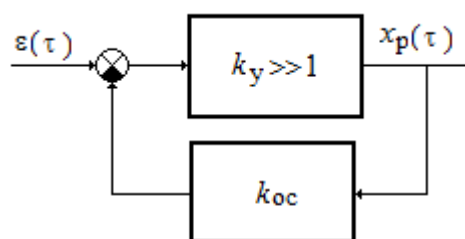


Рис. 8.32. Структурная схема П-регулятора

Запишем передаточную функцию регулятора (рис. 8.32):

$$W_p(p) = \frac{W_y(p)}{1 + W_y(p)W_{oc}(p)} = \frac{1}{\frac{1}{W_y(p)} + W_{oc}(p)}. \quad (8.92)$$

Если усилитель по динамическим свойствам подобен усилительному звену и  $W_y(p) = k_y \gg 1$ , то величиной  $1/k_y$  по сравнению с

$W_{oc}(p)$  можно пренебречь. Тогда выражение (8.92) примет вид

$$W_p(p) \approx 1/W_{oc}(p). \quad (8.93)$$

Это **аналитическая форма свойства предельной системы**.

Используя свойство предельной системы (8.93), найдем выражение для обратной связи, чтобы это был П-регулятор:

$$k_p = 1/W_{oc}(p). \quad (8.94)$$

Отсюда  $W_{oc}(p) = 1/k_p$ , и в качестве звена обратной связи необходимо использовать усилительное звено с коэффициентом усиления  $k_{oc} = 1/k_p$ . Часто такую обратную связь называют **жёсткой**.

**Интегральные регуляторы** (И-регуляторы) по динамическим свойствам подобны интегрирующему звену, реализующему закон регулирования:

$$x_p(\tau) = \frac{1}{T_i} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau, \quad (8.95)$$

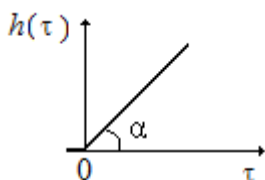


Рис. 8.33. График переходной функции И-регулятора

где  $T_i$  — время интегрирования — параметр настройки.

Переходная функция интегрального регулятора имеет вид (рис. 8.33)

$$h(\tau) = \frac{1}{T_i} \tau. \quad (8.96)$$

Время интегрирования  $T_i$  определяет скорость перемещения регулирующего органа ( $\operatorname{tg} \alpha = 1/T_i$ ).

В связи с малым быстродействием интегральные регуляторы прямого действия применяются для регулирования быстропротекающих вспомогательных процессов в объектах с самовыравниванием или используются в структуре других регуляторов непрямого действия.

**Пропорционально-интегральные регуляторы** (ПИ-регуляторы) в законе регулирования содержат пропорциональную и интегральную составляющие

$$x_p(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_i} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \quad (8.97)$$

и имеют два параметра настройки —  $k_p$  и  $T_i$ .

Электронные ПИ-регуляторы реализуют пропорционально-интегральный закон несколько в ином виде:

$$x_p(\tau) = k_p \left[ \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (8.98)$$

Применим к выражению (8.97) операцию прямого преобразования Лапласа:

$$X_p(p) = \left[ k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \right] E(p). \quad (8.99)$$

Тогда передаточная функция ПИ-регулятора будет иметь вид

$$W_p(p) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} p}. \quad (8.100)$$

Из выражения (8.100) и рис. 8.34 следует, что в динамическом отношении ПИ-регулятор подобен параллельному соединению пропорционального и интегрального регуляторов.

Применим к выражению (8.99) операцию обратного преобразования Лапласа и найдем переходную функцию ПИ-регулятора:

$$h(\tau) = L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{1}{T_{\text{и}} p} \frac{1}{p} \right\} = k_p \cdot 1(\tau) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \tau \cdot 1(\tau). \quad (8.101)$$

В момент подачи ступенчатого входного сигнала (рис. 8.35) выходной сигнал регулятора изменяется в  $k_p$  раз, а затем линейно растет со скоростью, определяемой величиной  $T_{\text{и}}$  ( $\text{tg} \alpha = 1/T_{\text{и}}$ ). Переходная функция электронного ПИ-регулятора, полученная из выражения (8.98), имеет вид

$$h(\tau) = L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{k_p}{T_{\text{и}} p} \frac{1}{p} \right\} = k_p \cdot 1(\tau) + \frac{k_p}{T_{\text{и}}} \tau \cdot 1(\tau). \quad (8.102)$$

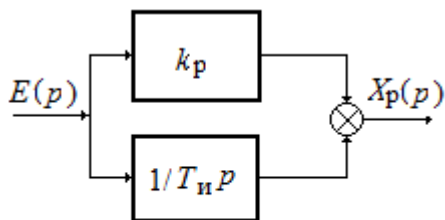


Рис. 8.34. Структурная схема ПИ-регулятора

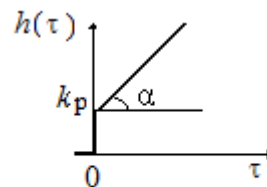


Рис. 8.35. График переходной функции ПИ-регулятора

В этом случае скорость нарастания выходного сигнала при  $\tau > 0$  будет зависеть от соотношения  $k_p / T_{\text{и}}$  ( $\text{tg} \alpha = k_p / T_{\text{и}}$ ).

Промышленные пневматические ПИ-регуляторы создаются путем параллельного соединения пропорциональной и интегральной составляющих (рис. 8.34).

Промышленные электронные ПИ-регуляторы создаются с использованием обратных связей и понятия предельной системы. При этом обратная связь может охватывать только усилитель (см. рис. 8.36, а) или усилитель с исполнительным механизмом (см. рис. 8.36, б).

Найдем выражения для передаточных функций обратной связи при реализации пропорционально-интегрального закона.

Если обратная связь охватывает усилитель, образуя предельную систему (8.93), то передаточная функция ПИ-регулятора (см. рис. 8.36, а) будет иметь вид

$$W_p(p) \approx \frac{1}{W_{oc}(p)} W_{им}(p). \quad (8.103)$$

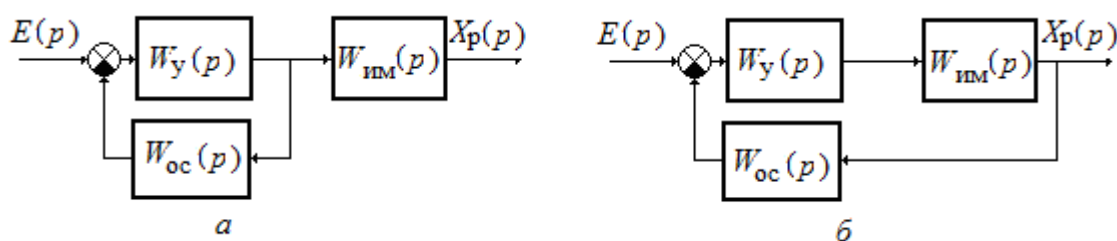


Рис. 8.36. Структурные схемы электронных ПИ-регуляторов  
Отсюда найдем передаточную функцию обратной связи:

$$W_{oc}(p) = \frac{W_{им}(p)}{W_p(p)}. \quad (8.104)$$

В электронных регуляторах в качестве исполнительного механизма используются асинхронные двигатели с редуктором, по динамическим характеристикам подобные интегрирующему звену  $W_{им}(p) = 1/T_{им}p$ .

Если передаточная функция регулятора должна иметь вид

$$W_p(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{и}p}\right) = k_p \frac{T_{и}p + 1}{T_{и}p}, \quad (8.105)$$

то передаточная функция обратной связи (8.104) определится зависимостью

$$W_{oc}(p) = \frac{1}{T_{им}p} \frac{1}{k_p} \frac{T_{и}p}{T_{и}p + 1} = \frac{T_{и}}{k_p T_{им}} \frac{1}{T_{и}p + 1} = \frac{k_{oc}}{T_{oc}p + 1}. \quad (8.106)$$

По динамическим свойствам звено обратной связи должно соот-

ветствовать аperiodическому звену первого порядка с параметрами  $k_{oc} = T_{и} / (k_p T_{им})$  и  $T_{oc} = T_{и}$ . Такая обратная связь часто называется **инерционной**.

Если обратная связь охватывает усилитель и исполнительный механизм, образуя предельную систему (8.93), то передаточная функция ПИ-регулятора (рис. 8.36, б) будет иметь вид

$$W_p(p) \approx \frac{1}{W_{oc}(p)}. \quad (8.107)$$

Отсюда найдем передаточную функцию обратной связи

$$W_{oc}(p) = \frac{1}{W_p(p)}. \quad (8.108)$$

В этом случае динамические характеристики исполнительного механизма не влияют на свойства регулятора. Если передаточная функция регулятора должна иметь вид (8.105), то передаточная функция обратной связи (8.108) определится зависимостью

$$W_{oc}(p) = \frac{1}{k_p} \frac{T_{и} p}{T_{и} p + 1} = \frac{k_{oc} T_{oc} p}{T_{oc} p + 1}. \quad (8.109)$$

По динамическим свойствам звено обратной связи должно соответствовать реальному дифференцирующему звену с параметрами  $k_{oc} = 1/k_p$  и  $T_{oc} = T_{и}$ .

**Пропорционально-интегральные регуляторы с введением производной в закон регулирования** (ПИД-регуляторы) строятся на базе ПИ-регулятора путем введения в закон составляющей, пропорциональной скорости изменения ошибки рассогласования. Как и в случае с ПИ-регуляторами, рассматривается два способа реализации:

а) в пневматических регуляторах

$$x_p(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}; \quad (8.110)$$

б) в электронных регуляторах

$$x_p(\tau) = k_p \left[ \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right], \quad (8.111)$$

где  $k_p$ ,  $T_{и}$  и  $T_d$  – параметры настройки.

Переходная функция ПИД-регулятора отличается от переходной функции ПИ-регулятора наличием слагаемого в виде единичного импульса:

$$\begin{aligned}
h(\tau) &= L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{1}{T_i p} \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ T_d p \frac{1}{p} \right\} = \\
&= k_p \cdot 1(\tau) + \frac{1}{T_i} \tau \cdot 1(\tau) + T_d \cdot 1'(\tau),
\end{aligned} \tag{8.112}$$

или

$$\begin{aligned}
h(\tau) &= L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{k_p}{T_i p} \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ k_p T_d p \frac{1}{p} \right\} = \\
&= k_p \cdot 1(\tau) + \frac{k_p}{T_i} \tau \cdot 1(\tau) + k_p T_d \cdot 1'(\tau).
\end{aligned} \tag{8.113}$$

Так как идеальное дифференцирующее звено не может быть физически реализовано, то фактически в закон вводится уравнение реального дифференцирующего звена, поэтому в переходной функции ПИД-регулятора не содержится в чистом виде единичный импульс (рис. 8.37, а), а прибавляется реакция реального дифференцирующего звена (рис. 8.37, б). Графики построены по уравнениям (8.112) и (8.114):

$$\begin{aligned}
h(\tau) &= L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{1}{T_i p} \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ k_d \frac{T_d p}{T_d p + 1} \frac{1}{p} \right\} = \\
&= k_p \cdot 1(\tau) + \frac{1}{T_i} \tau \cdot 1(\tau) + k_d e^{-\tau/T_d} \cdot 1'(\tau),
\end{aligned} \tag{8.114}$$

или

$$\begin{aligned}
h(\tau) &= L^{-1} \left\{ k_p \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ \frac{k_p}{T_i p} \frac{1}{p} \right\} + L^{-1} \left\{ k_p k_d \frac{T_d p}{T_d p + 1} \frac{1}{p} \right\} = \\
&= k_p \cdot 1(\tau) + \frac{k_p}{T_i} \tau \cdot 1(\tau) + k_p k_d e^{-\tau/T_d} \cdot 1'(\tau).
\end{aligned} \tag{8.115}$$

Промышленные пневматические ПИД-регуляторы системы СТАРТ в своем составе имеют пропорциональную, интегральную и дифференцирующую составляющие с соответствующими параметрами настройки.

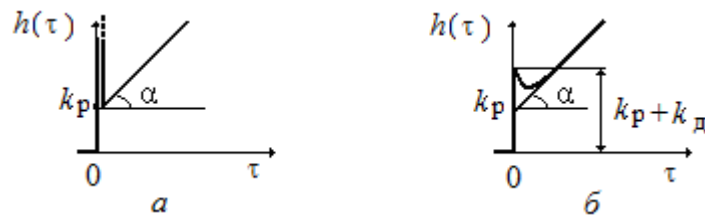


Рис. 8.37. Графики переходных функций ПИД-регулятора с идеальным и реальным дифференцирующим звеном



Промышленные электронные ПИД-регуляторы обычно строятся на базе ПИ-регуляторов с использованием корректирующих устройств.

**Позиционные регуляторы** позволяют иметь на выходе два (двухпозиционные) или три (трехпозиционные) сигнала известной величины.

Такие регуляторы реализуются на базе релейных устройств. Наибольшее распространение получили двухпозиционные регуляторы (см. рис. 8.38). В случае идеального двухпозиционного регулятора (см. рис. 8.38 *а, б*), при достижении регулируемой величиной заданного значения  $y = y_{зд}$ , регулирующее воздействие  $x_p$  переходит из состояния 1 в состояние 2. В случае двухпозиционного регулятора с зоной нечувствительности (см. рис. 8.38, *в*) переключение состояния происходит по разным траекториям при возрастании и убывании регулируемого параметра ( $\delta_y$  – зона нечувствительности).

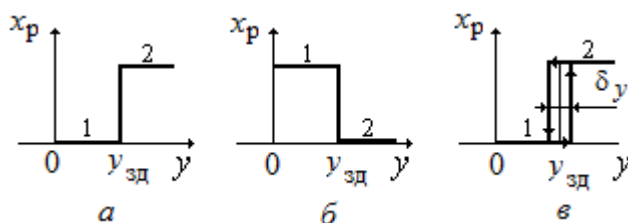


Рис. 8.38. Статические характеристики идеальных и с зоной чувствительности регуляторов

Позиционные регуляторы просты по конструкции и надежны, поэтому получили широкое распространение при регулировании параметров технологических процессов, не требующих высокого качества регулирования.

## 8.10. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Регулирующее воздействие с выхода регулятора поступает на вход **исполнительного механизма**, предназначенного для перемещения регулирующего органа.

В зависимости от категории производства по пожаро- и взрывоопасности для автоматического и дистанционного управления используются пневматические и электрические исполнительные механизмы.

**Пневматические исполнительные механизмы** (ИМ) подразделяются на мембранные (рис. 8.39, *а*) и поршневые (рис. 8.39, *б*), обеспечивающие возвратно-поступательное движение выходного элемента.

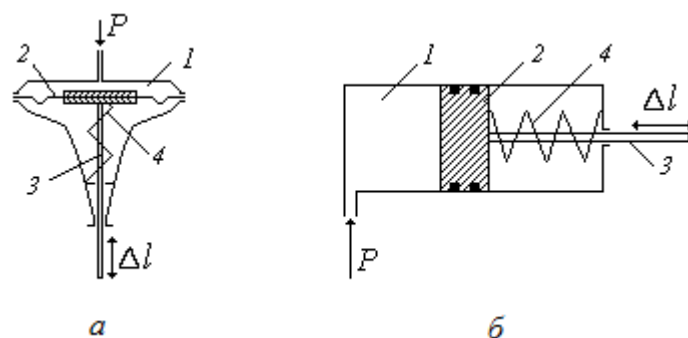


Рис. 8.39. Пневматические исполнительные механизмы

В верхнюю полость *1* **мембранного пневматического ИМ** подается командный унифицированный сигнал  $P = 20 \div 100$  кПа, под действием которого вялая мембрана 2 с жестким центром прогибается. Вследствие этого перемещается шток 3 и сжимается пружина 4. Перемещение штока  $\Delta l$  передается на регулирующий орган. **Это исполнительный механизм прямого действия.** В **ИМ обратного действия** при увеличении командного давления  $P$ , подаваемого под мембрану, свободный конец штока движется вверх. При прекращении подачи командного давления шток ИМ под действием пружины возвращается в исходное состояние. В **поршневых ИМ** командное давление действует на поршень 2, который перемещает шток 3.

Основными элементами **электрических исполнительных механизмов** являются электрический двигатель, редуктор для понижения числа оборотов, выходной вал с приспособлением для сочленения ИМ с регулирующим органом, ручной привод, устройство с конечными выключателями для останова ИМ в крайних положениях, устройство обратной связи, тормозное устройство, указатель положения ИМ. У **однооборотных ИМ** выходной вал поворачивается на 0,25 или 0,63 оборота. Кроме этого, в системах автоматического регулирования применяются **многооборотные и прямоходные ИМ**. Последние предназначены для прямолинейного перемещения с постоянной скоростью регулирующих органов.

В регулирующем органе при перемещении золотника 1 относительно седла 2 (рис. 8.40) изменяется проходное сечение и расход среды, проходящей через регулирующий орган. В химической промышленности в качестве регулирующих органов используются клапаны и заслонки. Клапаны делятся на односедельные (рис. 8.40, а) и двухседельные (рис. 8.40, б и в). **Односе-**

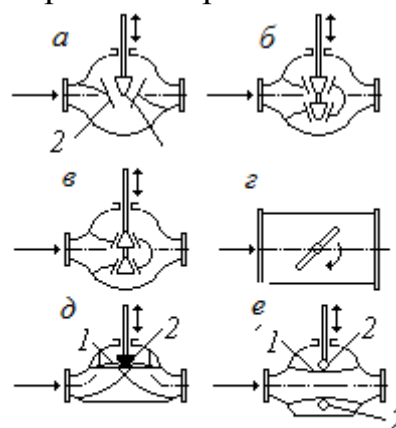


Рис. 8.40. Схемы регулирующих органов

**дельные клапаны** используются для изменения малых расходов вещества при низких давлениях, так как на клапан действует выталкивающая сила среды. В **двухседельных клапанах** затвор уравновешен за счет перераспределения потока среды, поэтому их можно применять при больших расходах среды и при высоких давлениях. **Диафрагмовые регулирующие органы** (рис. 8.40, д) используются для регулирования потоков агрессивных сред. Диафрагма 1, изготовленная из резины или фторопласта, закреплена по периферии. Центр диафрагмы прогибается под действием силы, приложенной штоком к крестовине 2, изменяя проходное сечение. **Шланговые регулирующие органы** (рис. 8.40, е) используются для регулирования шламообразных потоков. Шланг 1 выполняется из резины с тканевой прослойкой. При изменении положения штока перемещаются траверсы 2, изменяя проходное сечение. Клапан с пневматическим исполнительным механизмом принято называть **пневматическим регулирующим органом**.

Регулирующие органы с пневматическими исполнительными механизмами могут быть **нормально открытые и нормально закрытые**. При отсутствии командного давления проходное сечение нормально открытого клапана (НО) полностью открыто, а нормально закрытого (НЗ) – полностью закрыто.

**Заслонка регулирующая** используется для изменения расхода газа. Шток ИМ с помощью рычага поворачивает заслонку, вследствие чего изменяется проходное сечение и изменяется расход газа (см. рис. 8.40, з).

## 8.11. Анализ и синтез одноконтурных АСР

Одноконтурные АСР наиболее широко используются для поддержания регулируемой величины  $y(\tau)$  в малой окрестности относительно её заданного постоянного значения  $y_{зд}(\tau) = \text{const}$  при воздействии со стороны внешних возмущений  $x_v(\tau)$  (рис. 8.41).

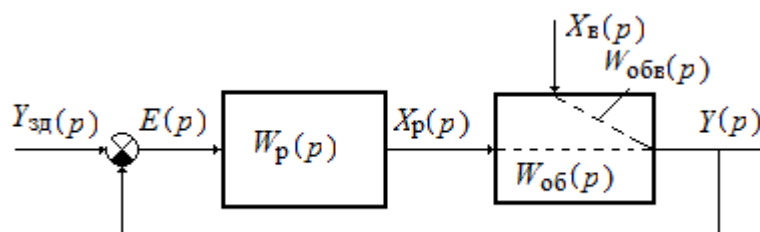


Рис. 8.41. Схема одноконтурной системы

Если математическое описание динамических характеристик элементов АСР представлено в виде передаточных функций, то, используя метод структурных преобразований, можно получить передаточную функцию замкнутой системы по каналу управления  $Y_{зд}(p) \rightarrow Y(p)$  и по

каналу возмущения  $X_B(p) \rightarrow Y(p)$ .

Передаточную функцию замкнутой системы по каналу управления получим с учетом замечательного **свойства суперпозиции** линейных систем: реакция системы на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие, что позволяет обнулять воздействия. В данном случае примем, что внешнее воздействие  $X_B(p) = 0$ . Оставшаяся часть системы соединена по принципу отрицательной обратной связи. Используя выражение (8.49), получим выражение передаточной функции замкнутой системы по каналу управления

$$W_{\text{зсу}}(p) = \frac{Y(p)}{Y_{\text{зд}}(p)} = \frac{W_{\text{об}}(p)W_p(p)}{1 + W_{\text{об}}(p)W_p(p)}. \quad (8.116)$$

Передаточную функцию одноконтурной замкнутой системы по каналу возмущения получим при условии равенства нулю заданного значения. Для этого выделим канал возмущения (рис. 8.42) и перенесем точку приложения сигнала возмущения с выхода на вход системы (рис. 8.43).

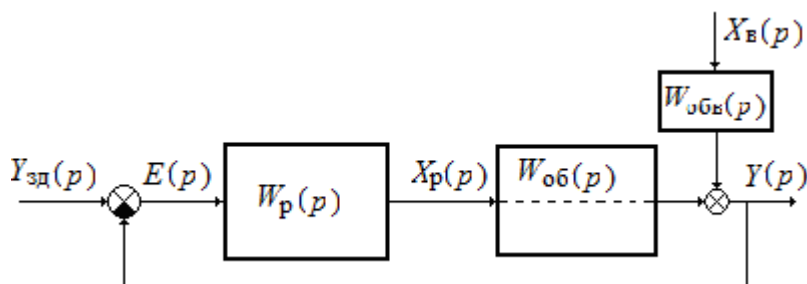


Рис. 8.42. Схема одноконтурной системы с выделенным каналом возмущения

Теперь сигнал возмущения поступает на выход системы, пройдя некий фильтр  $W_{\Phi}(p)$ , регулятор и объект. Запишем выражения для изображения выходного сигнала  $Y(p)$  в соответствии со схемами, изображенными на рис. 8.42 и 8.43, при условии  $Y_{\text{зд}}(p) = 0$ :

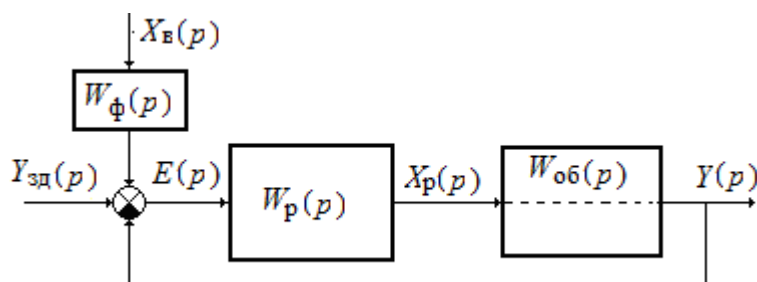


Рис. 8.43. Эквивалентная схема замкнутой АССР

$$Y(p) = W_{обв}(p)X_B(p); \quad (8.117)$$

$$Y(p) = W_{об}(p)W_p(p)W_\phi(p)X_B(p). \quad (8.118)$$

Чтобы схемы были эквивалентными, должно выполняться условие:

$$W_{обв}(p) = W_{об}(p)W_p(p)W_\phi(p).$$

Отсюда получим выражение передаточной функции фильтра

$$W_\phi(p) = \frac{W_{обв}(p)}{W_{об}(p)W_p(p)}. \quad (8.119)$$

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 8.43, при  $Y_{зд}(p) = 0$  фильтр последовательно соединен с замкнутой системой, поэтому

$$W_{зсв}(p) = W_\phi(p)W_{зсу}(p) = \frac{W_{обв}(p)}{W_{об}(p)W_p(p)} \cdot \frac{W_{об}(p)W_p(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)},$$

или

$$W_{зсв}(p) = \frac{W_{обв}(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)}. \quad (8.120)$$

Полученные передаточные функции замкнутой системы по каналу управления (8.116) и по каналу возмущения (8.120) можно использовать с целью построения дифференциальных уравнений для решения вопросов анализа АСР.

Для получения дифференциального уравнения системы к выражению соответствующей передаточной функции нужно применить обратную процедуру перехода от функций комплексного переменного к функциям вещественной переменной.

Пусть передаточная функция АСР имеет вид

$$W_{зсу}(p) = \frac{Y(p)}{Y_{зд}(p)} = \frac{k}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Запишем уравнение системы в операторной форме:

$$T_3^3 p^3 Y(p) + T_2^2 p^2 Y(p) + T_1 p Y(p) + Y(p) = k Y_{зд}(p).$$

Теперь, используя свойство преобразования Лапласа – изображение дифференциала, запишем дифференциальное уравнение динамики:

$$T_3^3 \frac{d^3 y(\tau)}{d\tau^3} + T_2^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = k y_{зд}(\tau). \quad (8.121)$$

Приравнивая нулю производные, получим уравнение статики

$$y_0 = k \cdot y_{зд,0}. \quad (8.122)$$

**Система называется устойчивой, если после снятия возмущения она возвращается в равновесное состояние.**

**Если система неустойчивая, то после снятия возмущения она удаляется от состояния равновесия.**

**Устойчивость системы определяется её внутренними свойствами, которые описываются уравнением свободного движения (однородное дифференциальное уравнение). Поэтому для исследования устойчивости системы, например (8.121), необходимо воспользоваться уравнением**

$$T_3^3 \frac{d^3 y(\tau)}{d\tau^3} + T_2^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = 0. \quad (8.123)$$

Для исследования устойчивости линейной системы  $n$ -го порядка необходимо использовать однородное дифференциальное уравнение

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + a_1 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) = 0, \quad (8.124)$$

решение которого имеет вид

$$y_{св}(\tau) = \sum_{i=1}^n c_i e^{p_i \tau}, \quad (8.125)$$

где  $c_i$  – постоянные интегрирования;  $p_i$  – корни характеристического уравнения

$$a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (8.126)$$

**Необходимым условием устойчивости** линейной системы является требование: **все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительными.**

**Необходимым и достаточным условием устойчивости** линейной системы является требование: **все корни характеристического уравнения должны быть отрицательными.** Тогда все слагаемые свободного движения системы с течением времени будут стремиться к нулю:

$$\lim y(\tau) = \lim \sum_{i=1}^n c_i e^{p_i \tau} = 0 \text{ при } \tau \rightarrow \infty. \quad (8.127)$$

Корни характеристического уравнения могут быть вещественные положительные и отрицательные ( $\pm \alpha$ ), комплексные сопряженные

с положительной и отрицательной вещественной частью ( $\pm \alpha \pm i\omega$ ), чисто мнимые ( $\pm i\omega$ ) и нулевые.

Каждый вещественный корень ( $p_i = \pm \alpha_i$ ) дает слагаемое в решении (8.125):

$$y_i(\tau) = c_i e^{\pm \alpha_i \tau}.$$

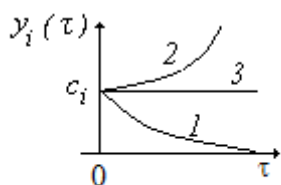


Рис. 8.44. Кривые свободного движения

Если вещественный корень  $p_i = -\alpha_i$ , то слагаемое с течением времени будет стремиться к нулю (рис. 8.44, кривая 1). Если все вещественные корни будут отрицательными, то все слагаемые свободного движения  $[y_{св}(\tau)]$  с течением времени будут стремиться к нулю, а система будет устойчива, так как выполняется условие (8.127). Если хотя бы один вещественный корень окажется положительным  $p_i = +\alpha_i$ , то соответствующее слагаемое с течением времени будет увеличиваться по модулю (рис. 8.44, кривая 2), тогда условие (8.127) выполняться не будет и система будет неустойчивой.

Каждая пара комплексных сопряженных корней ( $p_i = -\alpha_i \pm i\omega_i$ ) в решении (8.125) дает слагаемое

$$y_i(\tau) = c_i e^{-\alpha_i \tau} \sin(\omega_i \tau + \varphi_i),$$

представляющее собой колебательную составляющую с убывающей во времени амплитудой (рис. 8.45), поэтому с течением времени амплитуда колебаний будет стремиться к нулю. Если все комплексные сопряженные корни будут иметь отрицательную вещественную часть, то система будет устойчивая. Если хотя бы одна пара комплексных сопряженных корней будет иметь положительную вещественную часть, то амплитуда этого слагаемого свободного движения с течением времени будет расти и система будет неустойчивой (рис. 8.46).

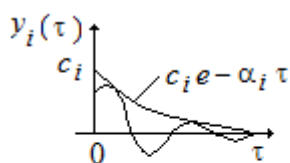


Рис. 8.45. Колебательная составляющая свободного движения

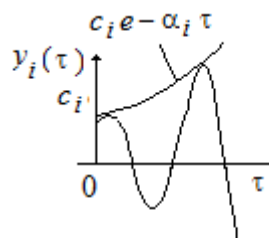


Рис. 8.46. Колебательная составляющая свободного движения системы

Если среди всех корней характеристического уравнения имеется

один корень нулевой  $p_i = 0$ , то в решении появится слагаемое  $y_i(\tau) = c_i$ , то есть появляется постоянная составляющая, и стабилизация свободного движения происходит не на нулевом уровне (см. рис. 8.44, прямая 3). В этом случае система называется **нейтрально-устойчивой**.

Если среди корней характеристического уравнения имеется одна пара чисто мнимых корней ( $p_i = \pm i\omega_i$ ), то в решении появляется периодическая составляющая

$$y_i(\tau) = c_i \sin(\omega_i \tau + \varphi_i)$$

и система (рис. 8.47) после затухания других составляющих перейдет в режим незатухающих гармонических колебаний с частотой  $\omega_i$ . Говорят, что такая система находится на **границе устойчивости**. При небольших изменениях свойств любого элемента системы она может стать устойчивой или неустойчивой.

Таким образом, если будут найдены все корни характеристического уравнения, то легко можно сделать вывод об устойчивости системы. Однако отсутствуют аналитические методы нахождения корней характеристического уравнения выше второго порядка, что заставило искать косвенные методы оценки устойчивости замкнутых систем без решения уравнений. Это возможно сделать с помощью **критериев устойчивости**. Впервые критерий устойчивости был сформулирован русским ученым И. А. Вышнеградским для линейных систем третьего порядка. В этом случае характеристическое уравнение системы имеет вид

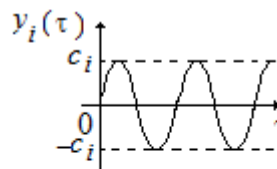


Рис. 8.47. Колебательная составляющая свободного движения системы

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

**Линейная система третьего порядка будет устойчива, если все коэффициенты характеристического уравнения положительные и произведение средних коэффициентов характеристического уравнения будет больше произведения крайних коэффициентов:**

$$a_2 a_1 > a_3 a_0. \quad (8.128)$$

Для систем произвольного порядка, не содержащих звенья чистого запаздывания, используется критерий устойчивости, предложенный математиком Гурвицем по просьбе словацкого ученого А. Стодолы. Несколько позже русским ученым А. В. Михайловым был разработан частотный критерий устойчивости, который после усовершенствования стало возможно использовать для анализа устойчивости систем произвольного порядка, содержащих звенья чистого запаздывания. Этот кри-



терий позволил не только анализировать устойчивость систем, но и решать задачи синтеза систем с заданными свойствами.

Обеспечение устойчивости линейных систем не является достаточным условием для обеспечения их работоспособности, так как анализ устойчивости ведется по приближенным математическим моделям и динамические свойства отдельных элементов в процессе эксплуатации могут изменяться, как правило, в сторону ухудшения, поэтому система должна обладать достаточным **запасом устойчивости**, или, другими словами, система должна находиться достаточно далеко от границы устойчивости. Для оценки запаса устойчивости линейных систем по аналогии с колебательным звеном второго порядка вводятся понятия **степени колебательности  $m$**  (8.69) и связанной с ней **степени затухания  $\psi$**  (8.68). Предполагается, что колебательная система произвольного порядка ведет себя подобно колебательной системе второго порядка. Практика подтверждает такое предположение.

Реальные системы работают в сложных условиях, когда на них действуют управляющие и возмущающие воздействия произвольной формы, которые сложно воспроизвести на приближенных моделях. Поэтому расчет АСР и **анализ качества процессов регулирования** производится при типовых воздействиях. Наиболее часто используется единичное ступенчатое воздействие. Тогда качество процесса регулирования оценивается следующими точечными оценками (рис. 8.48).

#### **Динамическая ошибка**

$A_d$ , или максимальное отклонение параметра от установившегося значения, должна быть минимальной. Максимальное значение  $A_d$  определяется технологическим регламентом.

#### **Степень затухания**

$\psi = (A_d - A_2) / A_d$  обычно задается в интервале от 0,75 до 0,95, в зависимости от особенностей технологического процесса. При больших степенях затухания имеет место большая динамическая ошибка.

**Время регулирования  $\tau_p$** , или длительность переходного процесса, определяется временем, по истечении которого отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения будет меньше некоторой наперед заданной величины  $\Delta$ :  $|h_y(\tau) - 1| \leq \Delta$  — для процесса регулирования по каналу управления (см. рис. 8.48, а) и  $|h_B(\tau)| \leq \Delta_B$  — для процесса регулирования по каналу возмущения (см. рис. 8.48, б). Жела-

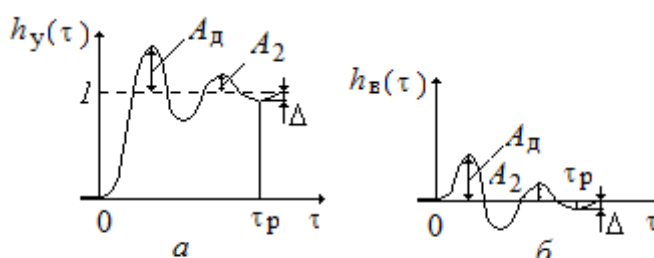


Рис. 8.48. Кривые процессов регулирования в колебательных системах

тельно иметь минимальное время регулирования. При этом необходимо учитывать такой факт, что при уменьшении времени регулирования увеличивается динамическая ошибка.

Используются и обобщенные показатели качества переходного процесса, учитывающие одновременно величину динамической ошибки и времени регулирования – **интегральные критерии качества**. Это площадь под графиком переходного процесса, определяемая интегралом от его модуля:

$$I_{\text{мод}} = \int_0^{\infty} |h_{\text{в}}(\tau)| d\tau \rightarrow \min. \quad (8.129)$$

Вместо этой интегральной оценки можно использовать интегральный квадратичный критерий

$$I_{\text{кв}} = \int_0^{\infty} h_{\text{в}}^2(\tau) d\tau \rightarrow \min. \quad (8.130)$$

Расчет параметров настройки регулятора, соответствующих минимуму интегральной оценки, производят при ограничениях, наложенных требованиями технологического регламента на переходный процесс.

В замкнутых АСР все элементы оказывают определенное влияние на свойства системы – устойчивость и качество переходных процессов. Наибольшее влияние оказывают свойства объекта регулирования. Например, **емкость объекта** влияет на выбор типа регулятора. Чем больше емкость, тем меньше скорость изменения регулируемой величины, тем меньшее воздействие должен иметь регулятор, и наоборот.

**Свойство самовыравнивания объекта** способствует повышению устойчивости системы и действует аналогично действию автоматического регулятора. Если объект не обладает свойством самовыравнивания, то задача управления значительно усложняется. В этом случае нельзя применять интегральные регуляторы.

**Наличие запаздывания в объекте** всегда ухудшает качество переходного процесса, поэтому нужно использовать любые способы, особенно на стадии проектирования объекта, для уменьшения запаздывания.

Как правило, автоматические системы регулирования разрабатываются еще на стадии проектирования. Используя сведения об аппаратном оформлении объекта регулирования и реализуемом технологическом процессе, в том числе из действующих аналогичных или родственных производств, выбираются технологические параметры, стабилизация которых позволит получить продукт заданного количества и качества. Если отсутствуют первичные преобразователи для получения текущей информации о параметре или существующие приборы имеют

большое запаздывание при получении информации, то выбирают косвенные параметры, стабилизация которых обеспечит стабилизацию основного параметра на заданном уровне. Например, скорость химической реакции и концентрация продукта зависят от температуры в реакторе. Во многих случаях продукт заданного качества можно получить путем стабилизации температуры в реакторе.

Далее изучается возможность наиболее эффективного воздействия на регулируемый параметр, то есть выбирается регулирующее воздействие. Эти проблемы будут решаться ниже, при изучении АСР типовых технологических процессов.

Все другие воздействия на процесс стараются стабилизировать путем создания соответствующих АСР. Если этого сделать нельзя, то воздействие относится к возмущающему. Влияние возмущений компенсируется АСР регулируемых параметров процесса.

Следующий этап создания АСР предусматривает выбор закона регулирования, обеспечивающего заданное качество процесса регулирования в соответствии с требованиями технологического регламента. Как правило, эти требования носят конкретный характер, начиная с типа переходного процесса: апериодический; колебательный с заданным запасом устойчивости; с минимальным значением квадратичного интегрального критерия. Необходимо выбрать тип системы: с позиционным регулятором; с регулятором непрерывного действия; одноконтурная или многоконтурная система регулирования. Для химической промышленности характерно использование регуляторов непрерывного действия в одноконтурных и многоконтурных системах.

Заданное качество процесса регулирования можно обеспечить, используя различные законы регулирования и стандартные рекомендации по их использованию. Решить такую задачу можно последовательным расчетом и анализом одноконтурных систем, начиная с простейших вариантов:

1. Выполняется расчет параметра настройки П-регулятора, строится переходный процесс и анализируется его качество. Если требования технологического регламента выполняются, то задача выбора закона регулирования может считаться решенной. В противном случае выполняется вторая итерация.

2. Выполняется расчет параметров настройки ПИ-регулятора, строится переходный процесс и анализируется его качество. Если требования технологического регламента выполняются, то задача выбора закона регулирования может считаться решенной. В противном случае выполняется третья итерация.

3. Выполняется расчет параметров настройки ПИД-регулятора, строится переходный процесс и анализируется его качество. Если тре-

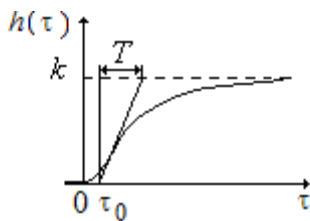


Рис. 8.49. Аппроксимация переходной функции объекта

бования технологического регламента выполняются, то задача выбора закона регулирования может считаться решенной. В противном случае выполняется четвертая итерация.

4. На основе выполнения трех предыдущих итераций делается вывод о невозможности выполнения требований технологического регламента процесса с помощью одноконтурной системы. Ставится и решается задача построения неодноконтурной системы регулирования и выбора закона регулирования в каждом контуре или использования регулятором дополнительной информации о промежуточном параметре и о внешнем возмущении. Выполняются аналогичные предыдущим итерации до тех пор, пока не будут выполнены требования технологического регламента.

Наиболее сложная проблема заключается в **расчете оптимальных параметров настройки регуляторов**. К настоящему времени разработано большое количество методов, основанных на использовании организованного поиска, расчетных формул и графиков, с помощью методов оптимизации и т. д. Для упрощения расчетов созданы пакеты прикладных программ, позволяющие автоматизировать процедуры расчета параметров настройки, построения переходных процессов в одноконтурных и неодноконтурных АСР, анализа качества переходного процесса и т. д.

Наиболее просты в применении расчетные формулы и графики. Рассмотрим в качестве примера один из вариантов.

Динамические свойства объекта регулирования с самовывравниванием представляются в виде дифференциального уравнения первого порядка с запаздывающим аргументом:

$$T \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = k \cdot x(\tau - \tau_0),$$

где  $T$  – постоянная времени;  $k$  – коэффициент усиления;  $\tau_0$  – время запаздывания.

Параметры модели  $k, T, \tau_0$  находят в результате аппроксимации переходной функции решением дифференциального уравнения первого порядка с запаздывающим аргументом (см. рис. 8.49). Для этого проводят касательную через точку перегиба переходной функции до пересечения с осью абсцисс и установившимся значением переходной функции.

Только три параметра модели определяют свойства объекта. Это позволяет по экспериментально построенным формулам рассчитывать параметры настройки регулятора одноконтурной АСР:

$$\text{для П-регулятора} \quad k_p = \frac{0,7T}{k\tau_0};$$

$$\text{для ПИ-регулятора} \quad k_p = \frac{0,7T}{k\tau_0}; \quad T_{\text{и}} = \tau_0 + 0,3T;$$

$$\text{для ПИД-регулятора} \quad k_p = \frac{1,1T}{k\tau_0}; \quad T_{\text{и}} = 2\tau_0; \quad T_{\text{д}} = 0,4\tau_0.$$

В результате расчета получим параметры настройки регулятора, обеспечивающие близкий к заданному запас устойчивости одноконтурной системы  $\psi = 0,9$ . Проверка результатов расчета производится путем построения переходного процесса в системе с помощью ПЭВМ. При необходимости параметры настройки корректируются, полагая, что полученные в результате расчета значения находятся в околооптимальной области.

Для решения задачи четвертой итерации следует сначала проанализировать структуру объекта, выбрать и построить **неодноконтурную систему регулирования или систему с использованием дополнительной информации**. Одноконтурные АСР не могут удовлетворить требованиям технологического регламента в тех случаях, когда объект обладает большим запаздыванием и большой инерционностью. Тогда в регулятор вводится дополнительная информация о возмущениях или об изменении специально подобранных величин.

**Каскадные системы** применяются для регулирования инерционных объектов с запаздыванием по каналу регулирования, если имеется возможность выбрать дополнительную, менее инерционную, промежуточную величину  $y_1$  (см. рис. 8.50), которую можно стабилизировать основным регулирующим воздействием. Основной (корректирующий) регулятор  $W_p(p)$  предназначен для поддержания основного параметра  $y$  на заданном значении. Его выходной сигнал  $x_p$  служит заданием для вспомогательного (стабилизирующего) регулятора  $W_{p1}(p)$ , который должен обеспечивать быстроедействие вспомогательного контура регулирования, за счет чего и достигается более высокое качество переходного процесса по сравнению с одноконтурной системой. Положительной стороной каскадных систем является тот факт, что в контурах используются стандартные регуляторы. Наиболее часто в качестве стабилизирующего выбирают П-регулятор, а в качестве корректирующего выбирают ПИ- или ПИД-регулятор. В случае необходимости число контуров регулирования может быть увеличено до трех.

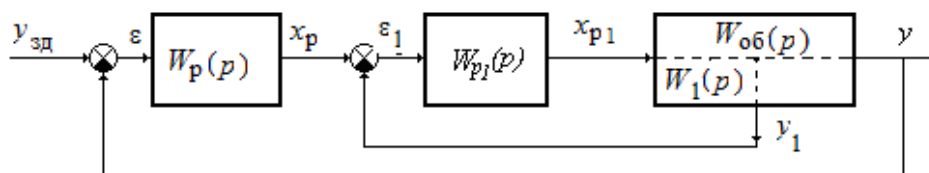


Рис. 8.50. Структурная схема каскадной АСР

В системах *с компенсацией возмущений* (рис. 8.51) повышение качества процесса регулирования достигается за счет использования информации о внешнем возмущении.

Из множества внешних возмущений выбирается возмущение  $x_B$ , наиболее сильно влияющее на качество переходного процесса. Это возмущение измеряется с помощью первичного преобразователя и передается на динамическое устройство – компенсатор  $W_K(p)$ , формирующее воздействие  $x_K$  с учетом динамических свойств одноконтурной системы и объекта по каналу возмущения  $W_{ов}(p)$ . Таким образом корректируется с упреждением во времени задание регулятору  $W_p(p)$ , чтобы компенсировать влияние возмущения на регулируемый параметр  $y$ , не дожидаясь его изменения. Степень компенсации влияния возмущения зависит от возможности физической реализации динамической структуры компенсатора, определяемой из **условия неполной инвариантности** выходного сигнала относительно возмущения.

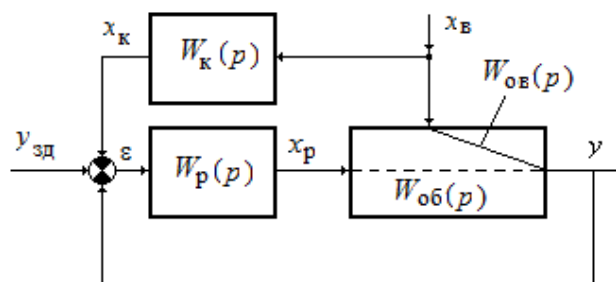


Рис. 8.51. Структурная схема АСР с компенсацией возмущения

Как правило, идеальный компенсатор реализовать не удастся из-за невозможности выполнения условия физической реализуемости. Обычно в качестве компенсаторов используют типовые звенья (апериодическое первого порядка и реальное дифференцирующее) или их комбинацию, поэтому при использовании реального компенсатора достигается частичная компенсация влияния возмущения, приводящая к улучшению качества переходного процесса.

Для улучшения качества процесса регулирования объектов с распределенными параметрами в регулятор вводится дополнительная информация о скорости изменения промежуточного параметра – **АСР с вводом сигнала по производной от промежуточной величины**.

Правильно выбранный сигнал из промежуточной точки  $y_1$  таких объектов обладает меньшей инерционностью, чем на выходе  $y$ . Чтобы обеспечить равенство выходной величины и задания в установившемся режиме, дополнительный сигнал  $x_d$  (рис. 8.52) в установившемся режиме должен быть равным нулю. Для этого промежуточный сигнал  $y_1$  пропускается через реальное дифференцирующее звено  $W_d(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1}$ , и тогда сигнал  $x_d$  существует только при изменении параметра  $y_1$ .

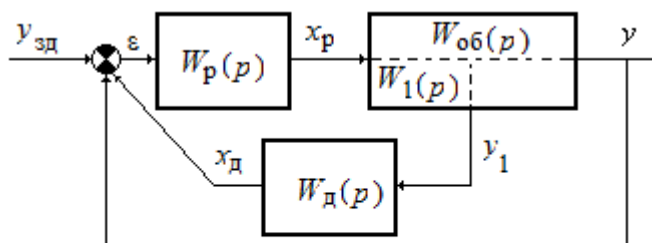


Рис. 8.52. Структурная схема АСР с вводом сигнала по производной от промежуточной величины

**Системы связанного регулирования** используются для стабилизации выходных параметров объектов с взаимосвязанными параметрами (рис. 8.53). Если перекрестные связи между параметрами слабые и ими можно пренебречь [ $W_{12}(p) \approx 0$  и  $W_{21}(p) \approx 0$ ], то строятся две независимые одноконтурные системы регулирования выходных параметров  $y_1$  и  $y_2$ .

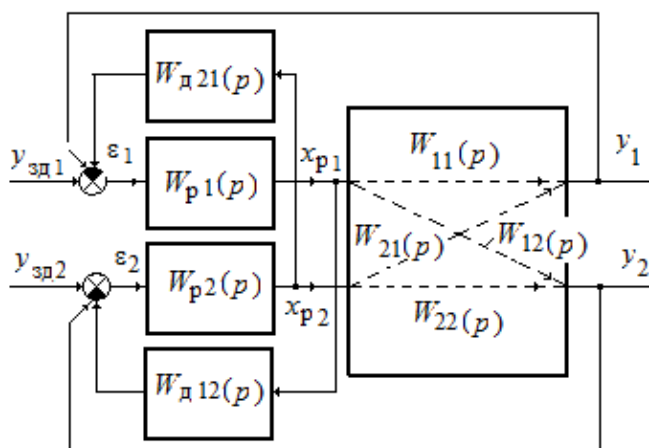


Рис. 8.53. Схема системы связанного регулирования

При наличии существенных перекрестных связей параметров объекта добиться устойчивой работы независимых систем невозможно, так как при выходе из равновесия одной системы приходит в движение вторая система, которая будет воздействовать на первую, и т. д. Говорят, что системы раскачивают друг друга, делая их неустойчивыми.

Проблема решается с помощью **условий автономности и физической реализуемости**. Они дают возможность построить и реализовать динамическую структуру дополнительных устройств  $W_{d12}(p)$  и  $W_{d21}(p)$  так, чтобы можно было компенсировать влияние перекрестных связей параметров объекта, что сделало бы одноконтурные АСР независимыми. Использование в качестве дополнительных устройств типовых звеньев ограничивает возможность выполнения условий автономности, поэтому полной независимости контуров регулирования добиться не удастся, но

обеспечивается устойчивая работа системы связанного регулирования в целом.

**Системы регулирования соотношения двух параметров** используются для поддержания регулируемого параметра в некотором соотношении с другим параметром (рис. 8.54).

Рассмотрим построение системы регулирования соотношения на примере испарительной установки.

В установку подается поток испаряемой жидкости  $G_1$  и поток пара  $G_2$ , соотношение которых должно быть определенным, т. е.  $(G_1 / G_2) = k$ . Поступающее в испаритель тепло должно обеспечивать испарение всей жидкости, сохраняя материальный баланс, который оценивается по уровню жидкости в испарителе. Регулятор соотношения  $W_p(p)$  сравнивает текущее значение соотношения потоков и изменяет поток пара  $G_2$  так, чтобы поддерживать их соотношение в соответствии с заданным значением  $k = \text{const}$ . Однако заданное соотношение расходов жидкости и пара может оставаться постоянным, если уровень возмущений, действующих на объект, достаточно низкий. При изменении расхода или температуры испаряемой жидкости будет изменяться интенсивность испарения, что скажется на изменении уровня жидкости в аппарате из-за нарушения материального баланса. В этом случае соотношение расходов жидкости пара в испаритель должно корректироваться регулятором  $W_k(p)$  по третьему параметру  $y$  – уровню жидкости в испарителе  $[k = f(y)]$ .

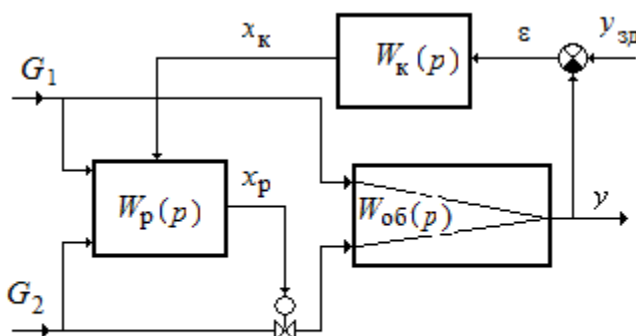


Рис. 8.54. Схема системы регулирования соотношения двух параметров

## 9. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

### АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

На предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности успешно работают автоматические системы регулирования, построенные на базе пневматических и электронных комплексов. Выбор приборов, регуляторов и исполнительных механизмов преимущественно определяется пожаро- и взрывоопасностью производства. В пожаро- и взрывоопасных производствах используются пневматические



приборы контроля и регулирования или слаботочные электронные взрывобезопасные приборы и регуляторы с пневматическими исполнительными механизмами. Для автоматизации пожаро- и взрывобезопасных производств, например в энергетике, в промышленности строительных материалов, применяются электронные приборы контроля и регулирования.

## 9.1. Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики

**Комплекс автоматических регуляторов «Старт»** построен на базе элементов «универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики» (УСЭППА) и применяется для автоматизации пожаро- и взрывоопасных производств. Система состоит из набора элементов, аналогичных по назначению электронным элементам.

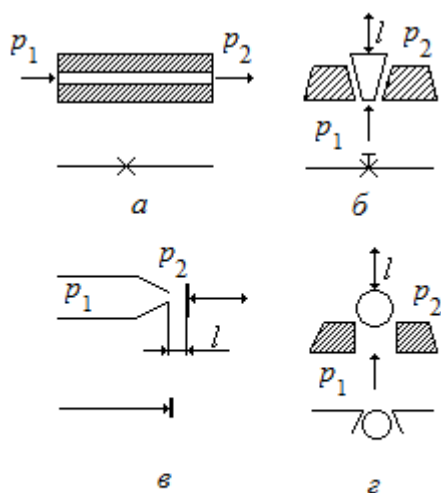


Рис. 9.1. Схемы дросселей и их условное изображение на схемах

который зависит от перепада давления на дросселе и величины проводимости регулируемого дросселя  $\beta$ :

$$G = \beta(p_1 - p_2). \quad (9.2)$$

Настройка дросселя ведется с помощью винта со шкалой, отградуированной в процентах (для установки коэффициента усиления) или в минутах (для установки постоянной времени).

**Переменный дроссель** выполняется в виде устройства сопло-заслонка (рис. 9.1, в) или шарик-цилиндр (рис. 9.1, г). При перемещении заслонки относительно сопла или шарика относительно цилиндра изменяется расход воздуха.

**Пневматические ёмкости** объемом 50 см<sup>3</sup> предназначены для на-

**Постоянный дроссель** (пневмосопротивление) предназначен для ограничения или изменения расхода воздуха и представляет собой капилляр длиной 20 мм и диаметром 0,18 или 0,30 мм (рис. 9.1, а).

Расход воздуха зависит от перепада давления:

$$G = \alpha(p_1 - p_2), \quad (9.1)$$

где  $\alpha$  — проводимость постоянного дросселя.

**Регулируемый дроссель** типа конус-конус предназначен для изменения расхода воздуха (рис. 9.1, б), ко-

копления сжатого воздуха при изменении давления. В комплекте с дросселями они образуют глухие или проточные камеры для реализации апериодического звена первого порядка (рис. 9.2).

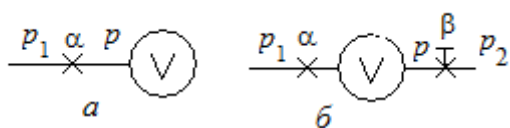


Рис. 9.2. Условное изображение глухой и проточной камер

Для изотермических условий найдем уравнение динамики глухой камеры (рис. 9.2, а). Скорость приращения массы воздуха в пневматической емкости определится уравнением

$$\frac{dm}{d\tau} = G, \quad (9.3)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха через постоянный дроссель.

Запишем уравнение состояния идеального газа в ёмкости:

$$pV = mR\theta, \quad (9.4)$$

определим выражение  $m = V \frac{p}{R\theta}$  и продифференцируем его:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{V}{R\theta} \cdot \frac{dp}{d\tau}. \quad (9.5)$$

Учитывая, что  $G = \alpha(p_1 - p)$ , получим

$$\frac{V}{\alpha R\theta} \cdot \frac{dp}{d\tau} + p = p_1, \quad (9.6)$$

или

$$T \frac{dp}{d\tau} + p = p_1. \quad (9.7)$$

Из полученного выражения (9.7) следует, что в динамическом отношении глухая камера является апериодическим звеном первого порядка.

Аналогично для проточной камеры (см. рис. 9.2, б) уравнение динамики можно получить в виде

$$T \frac{dp}{d\tau} + p = k_1 p_1 + k_2 p_2, \quad (9.8)$$

где  $k_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$ ;  $k_2 = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ ;  $T = \frac{V}{(\alpha + \beta)R\theta}$ .

В динамическом отношении это тоже апериодическое звено первого порядка с двумя входными воздействиями –  $p_1$  и  $p_2$ .

На базе пневматических дросселей строятся **дроссельные сумматоры** (рис. 9.3).

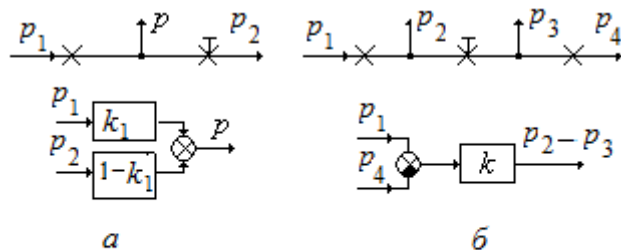


Рис. 9.3. Дроссельные сумматоры и их структурные схемы

**Сумматор с двумя дросселями** (рис. 9.3, а) имеет два входных сигнала –  $p_1$  и  $p_2$  и выходной сигнал  $p$ . Поток воздуха движется слева направо.

В соответствии с равенством расхода воздуха через дроссели запишем выражение

$$\alpha(p_1 - p) = \beta(p - p_2), \quad (9.9)$$

из которого найдем

$$p = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_2 = k_1 p_1 + k_2 p_2 = k_1 p_1 + (1 - k_1) p_2. \quad (9.10)$$

За счет изменения проводимости дросселей можно устанавливать выходное давление в достаточно широком диапазоне между  $p_1$  и  $p_2$ . Иногда такие сумматоры называют делителями давления. Если давление  $p_2$  сделать постоянным, например  $p_2 = 20$  кПа, то выходное давление  $p$  будет изменяться пропорционально изменению давления  $p_1$ , как у пропорционального звена ( $\Delta p = k_1 \Delta p_1$  и  $k_1 < 0$ ).

**Сумматор с тремя дросселями** (рис. 9.3, б) преобразует разность входных давлений  $p_1$  и  $p_4$  в разность выходных сигналов  $p_2$  и  $p_3$  по пропорциональному закону.

Воспользовавшись выражением (9.10) для сумматора с двумя дросселями, запишем равенства:

$$p_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_3; \quad (9.11)$$

$$p_3 = \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_2 + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_4. \quad (9.12)$$

Из равенства (9.11) исключим  $p_3$ , а из равенства (9.12) исключим  $p_2$  и найдем разность давлений:

$$p_2 - p_3 = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta} (p_1 - p_4) = k(p_1 - p_4), \quad (9.13)$$

где  $k = \alpha / (\alpha + 2\beta)$  может изменяться от 0,03 до 0,98.

**Эластичные мембраны** изготавливаются из прорезиненной ткани,

тефлона, капроновой пленки и других материалов (рис. 9.4).

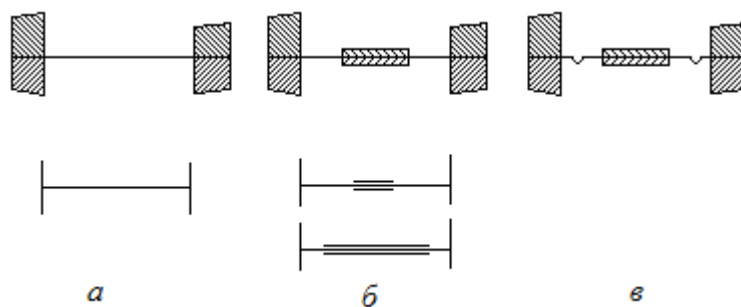


Рис. 9.4. Схемы мембран и их условное обозначение

Плоские (рис. 9.4, а), плоские с жестким центром (рис. 9.4, б) и гофрированные с жестким центром (рис. 9.4, в) мембраны применяются для изготовления различных элементов. Рассмотрим устройство некоторых из них.

**Трехмембранный элемент сравнения** предназначен для сравнения двух параметров (рис. 9.5).

Воздух питания через переменный дроссель поступает в камеру Г и через перемычку в камеру А, из которой уходит в атмосферу также через переменный дроссель. Три мембраны с жесткими центрами объединены в блок с помощью шпильки. Положе-

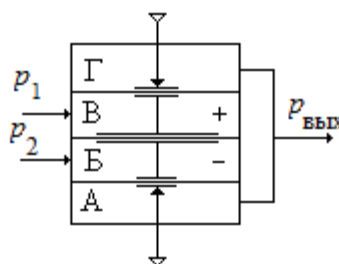


Рис. 9.5. Трехмембранный элемент сравнения

ние блока мембран зависит от разности давлений в камерах Б и В, куда поступает воздух с давлениями  $p_2$  и  $p_1$  соответственно. Эффективная поверхность мембраны, разделяющей камеры Б и В, значительно больше эффективных поверхностей других мембран. Если  $p_1 > p_2$ , то  $Fp_1 > Fp_2$ , и под действием разности этих сил блок мембран опустится вниз. При этом дроссель в камере Г откроется полностью, а в камере А закроется полностью и в перемычке установится максимальное давление  $p_{\text{вых}} = 100$  кПа. Если  $p_1 < p_2$ , то под действием разности сил, действующих на мембрану, разделяющую камеры Б и В, блок мембран поднимется вверх и дроссель в камере Г полностью закроется, в камере А полностью откроется. Приток воздуха прекратится, в камерах А и Г давление сравняется с атмосферным, поэтому  $p_{\text{вых}}$  будет равно нулю. Так как равновесие блока мембран является неустойчивым, то он всегда будет занимать одно из крайних положений и выходное давление будет равно нулю или 100 кПа.

Аналогично можно рассмотреть работу **пятимембранного эле-**

**мента сравнения** (рис. 9.6). Сравниваются четыре входных давления. При  $(p_1 + p_3) > (p_2 + p_4)$  блок мембран опустится вниз и выходное давление станет равным  $p_{\text{вых}} = 100$  кПа. При  $(p_1 + p_3) < (p_2 + p_4)$  блок мембран поднимется в верхнее положение и выходное давление станет равным нулю.

Пятимембранный элемент сравнения можно использовать в качестве **сумматора** (рис. 9.7), если выходное давление  $p_{\text{вых}}$  направить в камеру Б, создав тем самым отрицательную обратную связь, которая обеспечит устойчивое равновесие при различных соотношениях входных давлений. При этом  $p_{\text{вых}} = p_1 - p_2 + p_3$ . Таким образом, обеспечивается алгебраическое суммирование трех входных давлений.

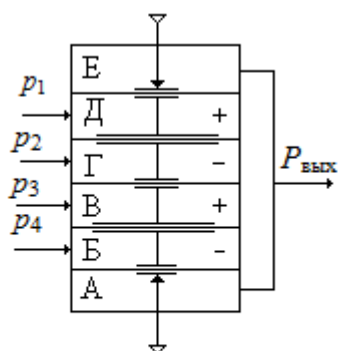


Рис. 9.6. Пятимембранный элемент сравнения

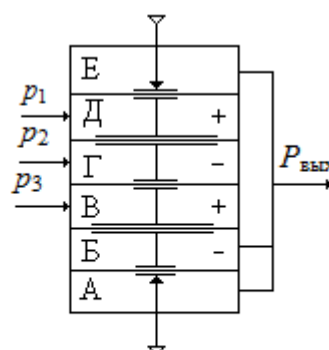


Рис. 9.7. Пятимембранный сумматор

Аналогично строится **семимембранный сумматор**, осуществляющий алгебраическое суммирование пяти входных сигналов:

$$p_{\text{вых}} = p_1 - p_2 + p_3 - p_4 + p_5.$$

В состав элементов УСЭППА также входят **маломощные повторители давления**, обеспечивающие пневматической цепи детектирующие свойства; **мощные повторители давления**, обеспечивающие усиление пневматического сигнала по мощности (на выходе повторителя давление равно входному, а расход воздуха многократно увеличивается); **задатчики**, позволяющие вручную установить давление воздуха, подаваемого на регулятор в качестве задания; **выключающие реле**, позволяющие отключать или переключать пневматический сигнал в другое устройство; **пневматические провода** в виде трубок диаметром  $1 \div 8$  мм, предназначенные для соединения элементов и устройств.

Пневматические провода из-за ограниченной скорости распространения сигнала давления относятся к объектам с распределенными параметрами, динамические свойства которых приближенно описываются уравнением

$$T \frac{d\Delta p_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau} + \Delta p_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \Delta p_{\text{ВХ}}(\tau - \tau_0), \quad (9.14)$$

где  $\tau_0 = l/v_{\text{звука}}$  – время прохождения сигнала по пневмопроводу;  $l$  – длина пневмопровода;  $v_{\text{звука}}$  – скорость распространения звука;

$T = 32\eta l^2 / (p_0 \chi d^2)$ ;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости воздуха;  $\chi$  – показатель адиабаты;  $p_0$  – нормальное давление. Чтобы пневмопровод не вносил искажение в регулирующее воздействие, поступающее на исполнительный механизм, его длина должна быть минимальной. В системах регулирования инерционных объектов она не должна превышать  $250 \div 300$  м.

## 9.2. Комплекс «Старт»

В комплекс «Старт» входят вторичные приборы, регулирующие и функциональные устройства.

**Вторичные приборы** в своей структуре содержат измерительные устройства (см. разд. 3.2) для измерения одного или нескольких параметров и дополнительные устройства. Входной сигнал унифицированный пневматический –  $20 \div 100$  кПа; давление питания сжатого воздуха  $p_{\text{пит}} = 140$  кПа; шкалы градуируются в процентах ( $0 \div 100$  %) или в единицах размерности измеряемой величины.

**Показывающие вторичные приборы** предназначены для измерения одного или двух параметров.

Таблица 9.1

Характеристики пневматических показывающих приборов

Тип	Назначение
ПКП.1	Показание значения одного параметра
ППВ 1.2	
ПКП.1П	Показание значения одного параметра и формирование пневматического сигнала при выходе его за пределы установленного диапазона
ПВ 2.2	
ПКП.1Э	Показание значения одного параметра и формирование электрического сигнала при выходе его за пределы установленного диапазона
ПКП.2	Показание значений двух параметров
ПКП.2.3	Показание значения одного параметра, показание значения давления и на исполнительном механизме
ПВ 3.2	Показание значения одного параметра, показание значения задания и давления на исполнительном механизме; переключение системы регулирования на ручное дистанцион-

	ное, автоматическое или автоматическое программное управление
ППМ–20П	Показание текущего и номинального значения одного из 20 параметров и давления на исполнительном механизме

Самопишущие вторичные приборы предназначены для показания и регистрации одного или нескольких параметров. Они снабжены лентопротяжным механизмом с пневматическим (индекс П) или электрическим (индекс Э) приводом.

Таблица 9.2

#### Характеристики самопишущих пневматических приборов

Тип	Назначение
РПВ4.2П	Запись и показание значения одного параметра
РПВ4.2Э	
РПВ4.3П	Запись и показание значения двух параметров
РПВ4.3Э	
РПВ4.5Э	Запись и показание значения двух параметров и показание третьего параметра
ПВ4.4П	Запись и показание значения трех параметров
ПВ4.4Э	
ПВ10.1П	Запись и показание значения одного параметра, показание значения задания и давления на исполнительном механизме; переключение системы регулирования на ручное дистанционное, автоматическое или автоматическое программное управление; формирование задающего и управляющего воздействия
ПВ10.1Э	
ПВ10.2П	Запись и показание значения двух параметров, показание значения задания и давления на исполнительном механизме; переключение системы регулирования на ручное дистанционное, автоматическое или автоматическое программное управление; формирование задающего и управляющего воздействия
ПВ10.2Э	

Приборы ПВ3.2, ПВ4.4П, ПВ4.4Э, ПВ10.1П, ПВ10.1Э, ПВ10.2П и ПВ10.2Э имеют пневматический разъем для подключения пневматических регулирующих устройств.

Прибор контроля *пневматический интегрирующий ПИК–1* предназначен для измерения количества вещества, протекающего по трубопроводу, путем непрерывного суммирования значений расхода за определенный промежуток времени. Входной сигнал пневматический – 20 ÷ 100 кПа.

*Устройства регулирующие* предназначены для технической реа-

лизации типовых законов регулирования.

**Устройство регулирующее позиционное ПР1.5-М1** предназначено для реализации двухпозиционного закона регулирования, построено на базе трехмембранного элемента сравнения 1 (рис. 9.8).

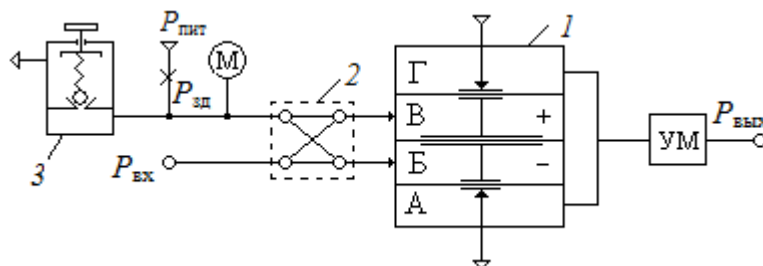


Рис. 9.8. Устройство регулирующее двухпозиционное

Значение регулируемого параметра  $p_{\text{вх}}$  через переключатель 2 подается в камеру Б элемента сравнения 1. В камеру В подается сформированное задатчиком 3 заданное значение  $p_{\text{зд}}$  в интервале  $20 \div 100$  кПа, контролируемое манометром М. В результате сравнения текущего значения регулируемого параметра с заданным на выходе формируется дискретный сигнал 0 или 100 кПа. Усиленное усилителем мощности УМ выходное давление подается на регулирующий орган. С помощью переключателя 2 устройство регулирующее может быть настроено на минимум или максимум, то есть входное давление может подаваться в камеру Б или в камеру В, а заданное давление соответственно в камеру В или в камеру Б.

**Устройство регулирующее позиционное ПР1.6-М1** предназначено для реализации двухпозиционного с настраиваемой зоной возврата закона регулирования, построено на базе пятимембранного элемента сравнения, на который от прибора вторичного подается давление, соответствующее текущему и заданному значению регулируемого параметра, и давление, соответствующее половине зоны возврата.

**Устройство регулирующее пропорциональное ПР2.8-М1** предназначено для реализации пропорционального закона регулирования (рис. 9.9), построено на базе пятимембранного элемента 1 и двух трехдрессельных сумматоров 2 и 3. Входное  $p_{\text{вх}}$  и заданное  $p_{\text{зд}}$  давления от прибора вторичного через переключатель 4 и трехдрессельный сумматор 2 поступают в камеры Д и Г. Опорное давление  $p_{\text{оп}}$  и выходное давление  $p_1$  через трехдрессельный сумматор поступают в камеры В и Б. Воздух питания поступает в камеру А повторителя давления 5, обеспечивающего постоянный расход, и в камеру А пятимембранного блока, откуда уходит в атмосферу. Равновесие блока мембран возможно при выполнении равенства





полнительный механизм установит регулирующий орган в среднее положение – 50 %.

Устройство регулирующее пропорциональное ПР2.8-М.1 крепится на приборе вторичном, имеющем станцию управления, с помощью специального пневматического разъема. При переходе на ручное управление подается командное давление  $p_k$  на отключающее реле ОР, и выходное давление  $p_{вых}$  на исполнительный механизм поступать не будет.

**Устройство регулирующее пропорционально-интегральное ПР3.31-М1** предназначено для реализации пропорционально-интегрального закона регулирования (см. рис. 9.10), построено на базе пятимембранного 1 и трехмембранного 6 блоков, глухой камеры 2 и двух двухдрессельных сумматоров 3 и 4. Входное  $p_{вх}$  и заданное  $p_{зд}$  давления от прибора вторичного через переключатель поступают в камеры В и Б пятимембранного блока 1, выходной сигнал которого  $p_1$  подается в камеру Г для создания единичной отрицательной обратной связи и через отключающее реле ОР и глухую камеру 2 подается в камеру Д для создания инерционной положительной обратной связи. Кроме того, выходное давление глухой камеры  $p_{и}$  через маломощный повторитель 5 в виде давления  $p_2 = p_{и}$  подается на вход двухдрессельных сумматоров 3 и 4, где суммируется с давлениями  $p_1$  и  $p_{д}$ . Давление  $p_{д}$  также через мощный повторитель УМ и отключающее реле ОР подается на исполнительный механизм в качестве выходного давления регулятора  $p_{вых}$ .

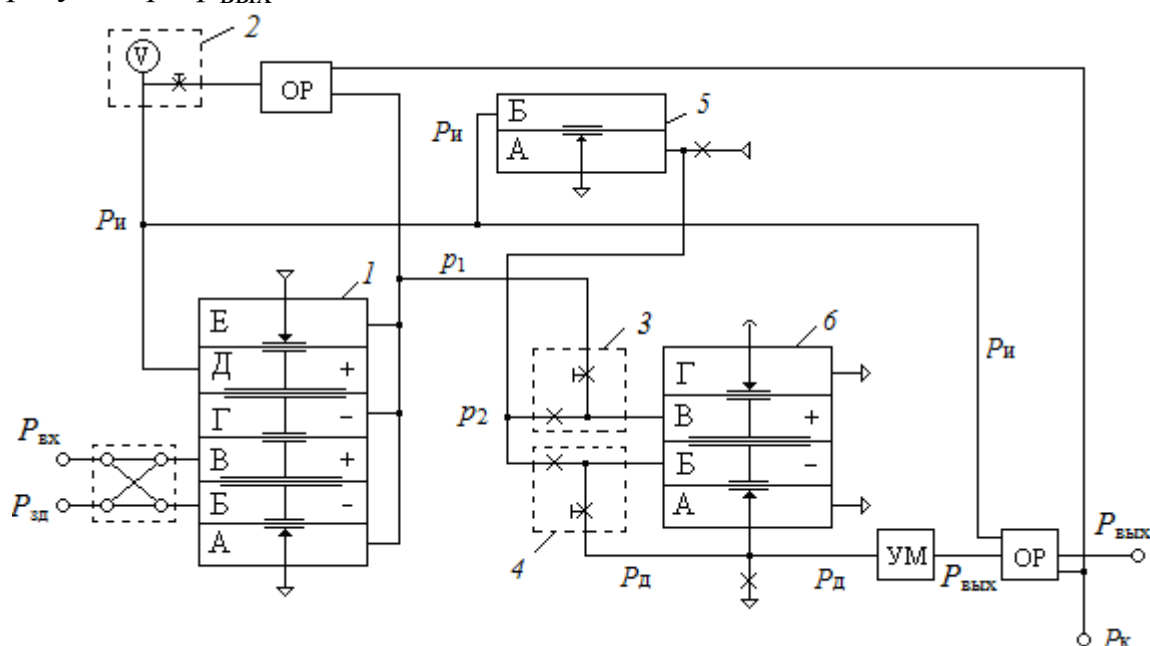


Рис. 9.10. Устройство регулирующее пропорционально-интегральное ПР3.32-М1

В состоянии равновесия, когда текущее значение регулируемого параметра равно заданному значению  $p_{\text{вх}} = p_{\text{зд}}$ , и выходное давление регулятора  $p_{\text{вых}}$  не изменяется. Если в результате возмущения текущее значение регулируемого параметра увеличится, то  $p_{\text{вх}}$  станет больше заданного давления  $p_{\text{зд}}$ . Под действием силы, развиваемой за счет разности давлений в камерах Б и В сумматора 1, блок мембран опустится вниз, приоткроется сопло, через которое поступает воздух питания, и прикроется сопло, через которое уходит воздух в атмосферу. Давление  $p_1$  увеличится, что приведет к увеличению выходного давления глухой камеры – инерционного звена  $p_{\text{и}}$ . При этом давление  $p_1$  будет больше давления  $p_2 = p_{\text{и}}$ , через дроссель 3 потечет воздух и увеличится давление в камере В сумматора 6. Блок мембран опустится вниз и прикроет сопло, через которое воздух выходит в атмосферу, что приведет к повышению давления  $p_{\text{д}}$ , возникновению потока воздуха через сумматор 4. Так как давление  $p_{\text{д}}$  будет больше давления  $p_2$ , то через сумматор 4 потечет воздух и в камере Б сумматора 6 будет увеличиваться давление до тех пор, пока не станет равным давлению в камере В. При этом будет увеличиваться выходное давление регулятора  $p_{\text{вых}}$ . Если давление  $p_{\text{вх}}$  уменьшится, то будет уменьшаться выходное давление  $p_{\text{вых}}$ .

Покажем, что рассмотренное выше устройство реализует пропорционально-интегральный закон регулирования. Для этого воспользуемся методом структурных преобразований.

Запишем уравнения двухдроссельных сумматоров 3 и 4:

$$p_{\text{в}} = k_3 p_1 + (1 - k_3) p_2; \quad (9.20)$$

$$p_6 = k_4 p_{\text{д}} + (1 - k_4) p_2, \quad (9.21)$$

где  $k_3 = \beta_3 / (\alpha + \beta_3)$ ;  $1 - k_3 = \alpha / (\alpha + \beta_3)$ ;  $k_4 = \beta_4 / (\alpha + \beta_4)$ ;  $1 - k_4 = \alpha / (\alpha + \beta_4)$ ;  $\alpha$  – проводимость постоянных дросселей;  $\beta_3$  и  $\beta_4$  – проводимости регулируемых дросселей сумматоров 3 и 4.

Так как  $p_2 = p_{\text{и}}$  и  $p_{\text{вых}} = p_{\text{д}}$ , то равенства (9.20) и (9.21), с учетом того, что давления  $p_{\text{в}}$  и  $p_6$  практически равны, можно записать в виде уравнения

$$k_3 p_1 + (1 - k_3) p_{\text{и}} = k_4 p_{\text{вых}} + (1 - k_4) p_{\text{и}}$$

и найти выражение для выходного давления:

$$p_{\text{вых}} = (k_3 / k_4) p_1 + (1 - k_3 / k_4) p_{\text{и}}. \quad (9.22)$$

Применим к выражению (9.22) операцию прямого преобразования Лапласа и получим

$$P_{\text{вых}}(p) = (k_3 / k_4) P_1(p) + (1 - k_3 / k_4) P_{\text{и}}(p). \quad (9.23)$$

Для нахождения изображений  $P_1(p)$  и  $P_{\text{и}}(p)$  воспользуемся структурными схемами, приведенными на рис. 9.11.

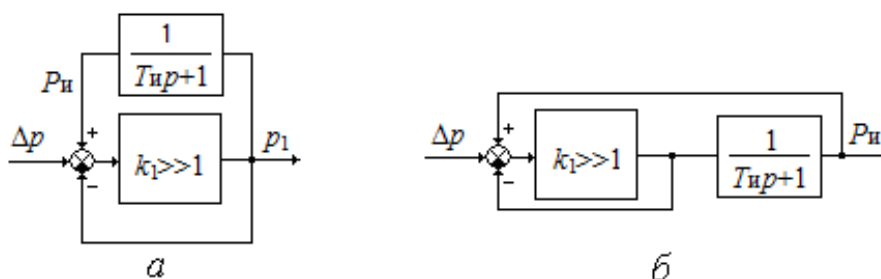


Рис. 9.11. Структурные схемы элементов устройства регулирующего ПР3.31-М1

Структурная схема элемента регулятора ПР3.31 по каналу  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}} \rightarrow p_1$  изображена на рис. 9.11, а. Усилитель с коэффициентом усиления  $k_1 \gg 1$  охвачен единичной отрицательной обратной связью и инерционной положительной обратной связью. Используя метод структурных преобразований и понятие предельной системы, запишем его передаточную функцию в виде

$$W_1(p) = \frac{P_1(p)}{\Delta P(p)} = \frac{k_1}{1 + k_1 - \frac{1}{T_{\text{ип}} p + 1}} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + 1 - \frac{1}{T_{\text{ип}} p + 1}}. \quad (9.24)$$

Так как слагаемое  $(1/k_1) \rightarrow 0$ , то им можно пренебречь, поэтому передаточная функция (9.24) примет вид

$$W_1(p) = \frac{P_1(p)}{\Delta P(p)} = \frac{1}{1 - \frac{1}{T_{\text{ип}} p + 1}} = \frac{T_{\text{ип}} p + 1}{T_{\text{ип}} p + 1 - 1} = \frac{T_{\text{ип}} p + 1}{T_{\text{ип}} p} = 1 + \frac{1}{T_{\text{ип}} p}. \quad (9.25)$$

Отсюда находим

$$P_1(p) = \left(1 + \frac{1}{T_{\text{ип}} p}\right) \cdot \Delta P(p). \quad (9.26)$$

В динамическом отношении рассматриваемый элемент регулятора по каналу  $\Delta p \rightarrow p_1$  подобен параллельному соединению усилительного и интегрирующего звена.

Структурная схема элемента регулятора ПР3.31 по каналу  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}} \rightarrow p_{\text{и}}$  изображена на рис. 9.11, б. Пятимембранный усилитель охвачен единичной отрицательной обратной связью и последовательно соединен с глухой камерой. Усилитель и глухая камера охвачены единичной положительной обратной связью. Используя понятие предельной системы, запишем передаточную функцию элемента в виде

$$W_2(p) = \frac{P_{\text{и}}(p)}{\Delta P(p)} = \frac{\frac{k_1}{1+k_1} \cdot \frac{1}{T_{\text{и}}p+1}}{1 - \frac{k_1}{1+k_1} \cdot \frac{1}{T_{\text{и}}p+1}} = \frac{\frac{k_1}{T_{\text{и}}p+1}}{1+k_1 - \frac{k_1}{T_{\text{и}}p+1}} = \frac{\frac{1}{T_{\text{и}}p+1}}{\frac{1}{k_1} + 1 - \frac{1}{T_{\text{и}}p+1}}.$$

Так как слагаемое  $(1/k_1) \rightarrow 0$ , то им можно пренебречь, поэтому передаточная функция  $W_2(p)$  примет вид

$$W_2(p) = \frac{P_{\text{и}}(p)}{\Delta P(p)} + \frac{\frac{1}{T_{\text{и}}p+1}}{1 - \frac{1}{T_{\text{и}}p+1}} = \frac{1}{T_{\text{и}}p+1-1} = \frac{1}{T_{\text{и}}p}. \quad (9.27)$$

Отсюда находим

$$P_{\text{и}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}}p} \cdot \Delta P(p). \quad (9.28)$$

В динамическом отношении рассматриваемый элемент регулятора по каналу  $\Delta p \rightarrow p_{\text{и}}$  подобен интегрирующему звену.

Полученные изображения –  $P_1(p)$  и  $P_{\text{и}}(p)$  – подставляем в уравнение (9.23) и находим уравнение регулятора в операторной форме:

$$\begin{aligned} P_{\text{вых}}(p) &= \frac{k_3}{k_4} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}}p}\right) \Delta P(p) + \left(1 - \frac{k_3}{k_4}\right) \frac{1}{T_{\text{и}}p} \Delta P(p) = \\ &= \frac{k_3}{k_4} \Delta P(p) + \frac{1}{T_{\text{и}}p} \Delta P(p). \end{aligned} \quad (9.29)$$

Переходя от изображений функций к их оригиналам и заменяя  $k_3/k_4 = k_p$ ,  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}}$ , получим уравнение регулятора ПР3.31-М1

$$p_{\text{вых}} = k_p(p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}}) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} (p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}}) d\tau, \quad (9.30)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_{\text{и}}$  – время интегрирова-

ния. Из выражения (9.30) следует, что параметры настройки регулятора ПР3.31-М1 являются независимыми.

Также как в случае пропорционального регулятора ПР2.8-М1, параметром настройки является предел пропорциональности  $\delta = (1/k_p) \cdot 100 \%$ , настраиваемый в интервале от 2 до 3000 % при помощи регулируемых дросселей сумматоров 3 и 4. При настройке  $\delta$  в интервале от 100 до 3000 % регулируемый дроссель сумматора 4 устанавливается на 100 %, что соответствует полному открытию дросселя 4 и  $k_4 \approx 1$ , а регулируемый дроссель сумматора 3 ставят на соответствующую отметку. При настройке  $\delta$  в интервале от 2 до 100 % регулируемый дроссель сумматора 3 устанавливают на 100 %, а регулируемый дроссель сумматора 4 ставят на соответствующую отметку.

Время интегрирования  $T_{\text{и}}$  устанавливается с помощью регулируемого дросселя глухой камеры в интервале от 0,05 до 100 мин.

Основная погрешность регулятора составляет  $\pm 0,5 \%$ .

Устройство регулирующее ПР3.31-М1 крепится на приборе вторичном, имеющем станцию управления, с помощью пневматического разъема.

**Устройство регулирующее пропорционально-интегральное ПР3.32-М1** предназначено для реализации пропорционально-интегрального закона регулирования. Отличается от устройства ПР3.31-М1 тем, что имеет в своей структуре местный задатчик и манометр для установки заданного значения регулируемого параметра  $p_{\text{зд}}$ . Устройство регулирующее ПР3.32-М1 крепится на щите управления с помощью специальной платы, имеющей пневматический разъем.

**Устройство регулирующее пропорционально-интегральное ПР3.33-М1 соотношения двух параметров** предназначено для регулирования соотношения двух параметров по пропорционально-интегральному закону и построено на базе устройства регулирующего ПР3.31-М1 и устройства умножения входных сигналов на постоянные коэффициенты (рис. 9.12).

Устройства умножения построены на базе двухдроссельных сумматоров, выходные сигналы которых определяются выражениями

$$p'_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta_1} p_1 + \frac{\beta_1}{\alpha + \beta_1} p_0;$$

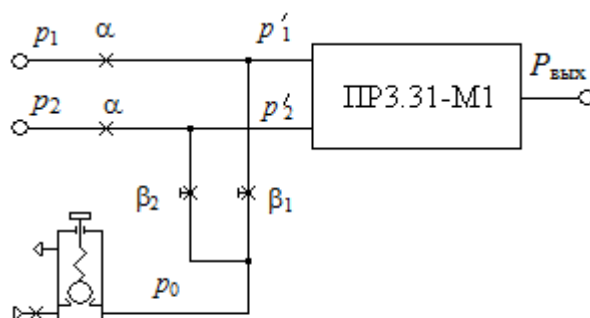


Рис. 9.12. Устройство регулирующее соотношения ПР3.33-М1

$$p'_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta_2} p_2 + \frac{\beta_2}{\alpha + \beta_2} p_0.$$

Пневматические сигналы  $p_1$  и  $p_2$  поступают от датчиков в виде унифицированных сигналов:  $p_1 = \Delta p_1 + 20$ ;  $p_2 = \Delta p_2 + 20$ . Опорный сигнал  $p_0$  формируется маломощным задатчиком и равен 20 кПа. С учетом этой зависимости для  $p'_1$  и  $p'_2$  можно записать в виде

$$p'_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta_1} \Delta p_1 + \frac{\alpha}{\alpha + \beta_1} p_0 + \frac{\beta_1}{\alpha + \beta_1} p_0 = k_1 \Delta p_1 + p_0; \quad (9.31)$$

$$p'_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta_2} \Delta p_2 + \frac{\alpha}{\alpha + \beta_2} p_0 + \frac{\beta_2}{\alpha + \beta_2} p_0 = k_2 \Delta p_2 + p_0. \quad (9.32)$$

Так как устройство регулирующее ПР3.31-М1 поддерживает равными давления  $p'_1$  и  $p'_2$ , то, приравняв выражения (9.31) и (9.32), получим

$$k_1 \Delta p_1 + p_0 = k_2 \Delta p_2 + p_0. \quad (9.33)$$

Отсюда можно заключить, что устройство регулирующее ПР3.33-М1 обеспечивает постоянное соотношение  $\Delta p_2 = k \Delta p_1$ , где  $k = k_1 / k_2$  – коэффициент соотношения, настраиваемый в интервале от 1 до 5.

**Устройство регулирующее пропорционально-интегральное ПР3.34-М1** предназначено для регулирования соотношения двух параметров по пропорционально-интегральному закону с изменением коэффициента пропорциональности  $p_k$  по третьему параметру и построено на базе устройства регулирующего ПР3.31-М1 и двухдроссельных делителей давления, в которых роль регулируемого дросселя выполняет сдвоенное сопло в камере А повторителя давления (рис. 9.13).

Начальное давление  $p_0 = 20$  кПа устанавливается задатчиком. Давление  $p'_k$  в камере Б зависит от величины корректирующего давления  $p_k$  и проводимости дросселя  $\beta_k$  и определяет проводимость сопел повторителя давления. С помощью дросселя с проводимостью  $\beta_1$  устанавливается соотношение между давлениями  $p_1$  и  $p_2$ , а с помощью дросселя с проводимостью  $\beta_k$  автоматически из-

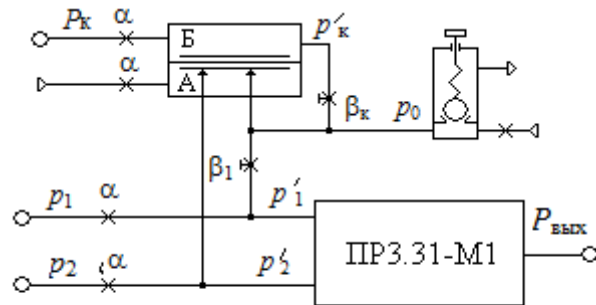


Рис. 9.13. Устройство регулирующее соотношения ПР3.34-М1

меняют это соотношение пропорционально текущему значению корректирующего сигнала  $p_k$ .

**Устройство регулирующее пропорционально-интегрально-дифференциальное ПР3.35-М1** предназначено для реализации пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования (см. рис. 9.14) и построено на базе двух пятимембранных и одного трехмембранного блоков, двух трехдрессельных сумматоров и вспомогательных устройств.

Структурно устройство состоит из трех звеньев: дифференцирующего 1, интегрирующего 2 и пропорционального (3, 4, 5).

Входной сигнал  $p_{вх}$  поступает одновременно на вход дифференцирующего и интегрирующего звеньев.

Дифференцирующее звено представляет собой трехмембранный блок, охваченный инерционной отрицательной обратной связью в виде глухой камеры. Выходной сигнал  $p_{дф}$  содержит сумму входного сигнала и сигнала скорости изменения входного сигнала с постоянной дифференцирования  $T_d$ , зависящей от проводимости регулируемого дросселя  $\beta_1$ :

$$P_{дф}(p) = (1 + T_d p) P_{вх}(p). \quad (9.34)$$



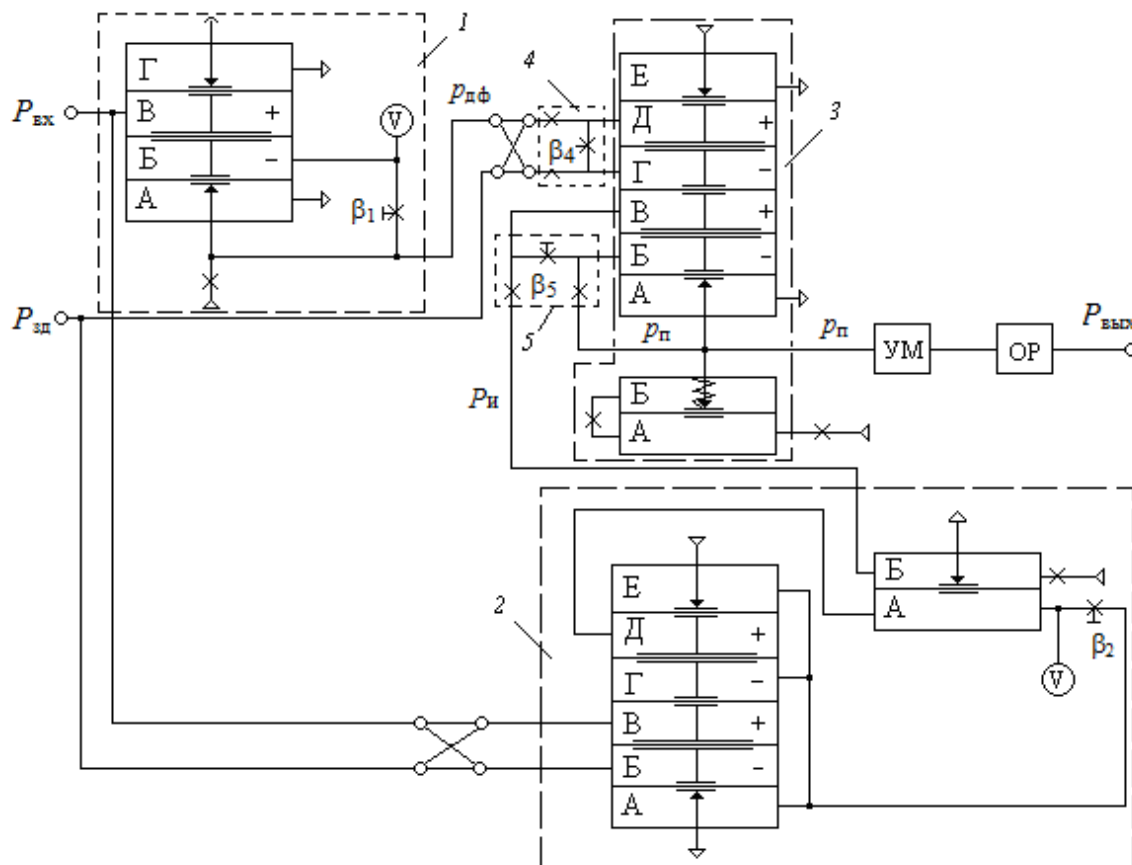


Рис. 9.14. Устройство регулирующее пропорционально-интегрально-дифференциальное ПР3.35-М1

Интегрирующее звено построено на базе пятимембранного блока, охваченного единичной отрицательной обратной связью и инерционной положительной обратной связью (см. рис. 9.13, б). По аналогии с выражением (9.28) запишем уравнение интегрирующего звена в операторной форме:

$$P_{\text{и}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p} \Delta P(p). \quad (9.35)$$

Выходной сигнал дифференцирующего звена  $p_{\text{д}}$  и заданное значение регулируемого параметра  $p_{\text{зд}}$  поступают на вход трехдроссельного сумматора 4. Тогда разность давлений в камерах Д и Г можно найти как

$$p_{\text{д}} - p_{\text{г}} = k_4 (p_{\text{дф}} - p_{\text{зд}}). \quad (9.36)$$

Выходные сигналы пропорционального  $p_{\text{п}}$  и интегрального  $p_{\text{и}}$  звеньев поступают на вход трехдроссельного сумматора 5. Тогда разность давлений в камерах Б и В можно найти как

$$p_6 - p_v = k_5(p_{\Pi} - p_{\text{и}}). \quad (9.37)$$

В состоянии равновесия сумма сил, действующих на блок мембран, должна быть равна нулю, поэтому имеет место равенство

$$k_4(p_{\text{дф}} - p_{3\partial}) = k_5(p_{\Pi} - p_{\text{и}}),$$

из которого, при условии, что  $p_{\text{вых}} = p_{\Pi}$ , найдем

$$p_{\text{вых}} = (k_4 / k_5)(p_{\text{дф}} - p_{3\partial}) + p_{\text{и}}. \quad (9.38)$$

Применим к уравнению (9.38) операцию прямого преобразования Лапласа:

$$P_{\text{вых}}(p) = \frac{k_4}{k_5} P_{\text{дф}}(p) - \frac{k_4}{k_5} P_{3\partial}(p) + P_{\text{и}}(p) \quad (9.39)$$

и подставим в него ранее полученные выражения (9.34) и (9.35):

$$P_{\text{вых}}(p) = \frac{k_4}{k_5} P_{\text{вх}}(p) + \frac{k_4}{k_5} T_{\text{д}} p P_{\text{вх}}(p) - \frac{k_4}{k_5} P_{3\partial}(p) + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \Delta P(p). \quad (9.40)$$

После очевидных преобразований перейдем от изображения функций к их оригиналам:

$$p_{\text{вых}} = k_p(p_{\text{вх}} - p_{3\partial}) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} (p_{\text{вх}} - p_{3\partial}) d\tau + k_p T_{\text{д}} \frac{dp_{\text{вх}}}{d\tau}, \quad (9.41)$$

где  $k_p = \frac{k_4}{k_5}$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_{\text{и}}$  – время интегрирования;  $T_{\text{д}}$  – время дифференцирования.

Также как в случае пропорционально-интегрального регулятора ПР3.31-М1, параметром настройки является предел пропорциональности  $\delta = (1/k_p) \cdot 100 \%$ , настраиваемый в интервале от 2 до 3000 % при помощи регулируемых дросселей сумматоров 4 и 5. При настройке  $\delta$  в интервале от 100 до 3000 % регулируемый дроссель сумматора 5 устанавливается на 100 %, что соответствует полному открытию дросселя 5 и  $k_5 \approx 1$ , а регулируемый дроссель сумматора 4 ставят на соответствующую отметку. При настройке  $\delta$  в интервале от 2 до 100 % регулируемый дроссель сумматора 4 устанавливают на 100 %, а регулируемый дроссель сумматора 5 ставят на соответствующую отметку.

Время интегрирования  $T_{\text{и}}$  устанавливается с помощью регулируемого дросселя  $\beta_2$  глухой камеры интегрирующего звена 2 в интервале от 0,05 до 100 мин.

Время дифференцирования  $T_d$  устанавливается с помощью регулируемого дросселя  $\beta_1$  глухой камеры дифференцирующего звена  $I$  в интервале от 0,05 до 10 мин.

Устройство регулирующее ПРЗ.35-М1 крепится на приборе вторичном, имеющем станцию управления, с помощью пневматического разъема.

**Функциональные и вычислительные устройства** предназначены для выполнения простейших операций с пневматическими сигналами.

**Прибор алгебраического суммирования ПФ1.1-М1** предназначен для алгебраического суммирования трех пневматических сигналов, а также для умножения и деления на два одного или суммы двух сигналов, изменения знака сигнала.

**Прибор извлечения квадратного корня ПФ1.17-М1** основан на реализации параболической зависимости вида

$p_{\text{вых}} = \sqrt{80(p_{\text{вх}} - 20)} + 20$  между входным и выходным пневматическими сигналами. Основная погрешность прибора составляет  $\pm 1,0 \%$ .

**Устройство пневматическое множително-делительное ПФ1.18** предназначено для перемножения двух параметров и деления их произведения на третий параметр, а также для перемножения двух параметров, деления меньшего параметра на больший и возведения параметра в квадрат. Устройство реализует зависимость

$$p_{\text{вых}} = (p_3 - 20) \frac{(p_2 - 20)}{(p_1 - 20)} \quad \text{при } p_1 > p_3.$$

**Прибор умножения на постоянный коэффициент ПФ1.3.9-М1** предназначен для умножения входного сигнала на постоянный коэффициент:

$$p_{\text{вых}} = k(p_{\text{вх}} - 20) + 20,$$

где  $k$  – постоянный коэффициент, настраиваемый в интервале от 0,2 до 1,0 и от 1,0 до 5,0. Основная погрешность прибора составляет  $\pm 0,5 \%$ .

**Устройство прямого предварения ПФ2.1-М1** предназначено для введения в процесс регулирования воздействия по скорости отклонения параметра от заданного значения:

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}} + T_d \frac{dp_{\text{вх}}}{d\tau},$$

где  $T_d$  – время дифференцирования, настраиваемое в интервале от 0,05 до 10 мин. Основная погрешность прибора составляет  $\pm 1,0 \%$ .

**Устройство обратного предварения ПФ3.1-М1** предназначено

для замедления ответного воздействия регулятора, вызванного изменением регулируемого параметра, на малоинерционный объект:

$$p_{\text{ВЫХ}}(\tau) = p_{\text{ВХ}}(\tau - \tau_0),$$

где  $\tau_0$  – время задержки сигнала, настраиваемое в интервале от 0,05 до 10 мин.

**Прибор селектирования сигналов ПФ4/5.1-М1** предназначен для сравнения двух пневматических сигналов и выдачи на выход сигнала, равного большему или меньшему сигналу.

**Усилитель мощности пневматический ПП1.5-М1** предназначен для передачи на расстояние пневматического сигнала, усиленного по мощности, в целях исключения влияния линии передачи на контур регулирования.

**Реле переключения пневматическое ПП2.5-М1** предназначено для коммутации пневматических сигналов в системах контроля и регулирования.

**Прибор ограничения сигналов ПП11.1-М1** предназначен для ограничения по максимуму или минимуму пневматических сигналов.

Рабочий диапазон ограничения сигнала по минимуму составляет 20÷70 кПа, а по максимуму – 50÷70 кПа.

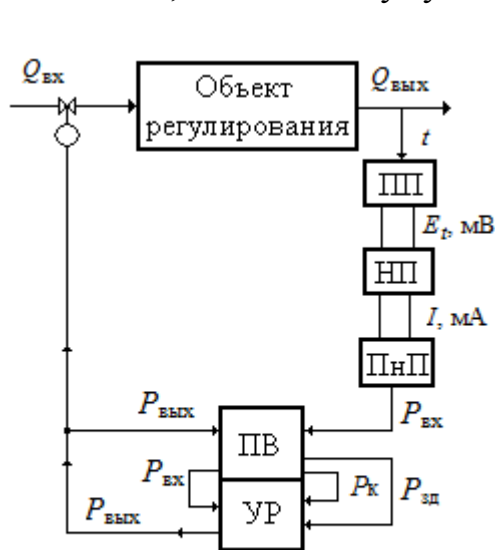


Рис. 9.15. Структура АСР температуры

Пример системы регулирования температуры, реализованной на базе приборов и устройств комплекса «Старт», приведен на рис. 9.15.

Выходной поток массы  $Q_{\text{ВЫХ}}$  нагревается в объекте регулирования за счет тепла, приходящего с входным потоком  $Q_{\text{ВХ}}$ . Автоматическая система регулирования должна обеспечить поддержание температуры выходного потока в некоторой малой окрестности относительно заданного значения  $\pm \Delta$ . Текущее значение температуры измеряется первичным преобразователем ПП и преобразуется в электрический

сигнал, который последовательно в нормирующем преобразователе НП преобразуется в нормированный сигнал и в электропневматическом преобразователе ПнП преобразуется в стандартный пневматический сигнал  $p_{\text{ВХ}}$ . Этот сигнал подается в прибор вторичный ПВ со станцией управления. На устройство регулирующее УР, соединенное с прибором вторичным с помощью пневматического разъема, подается текущее

$p_{\text{вх}}$  и заданное значение  $p_{\text{зд}}$  регулируемого параметра. Сигнал рассогласования  $\varepsilon = p_{\text{вх}} - p_{\text{зд}}$  по структурно закреплённому алгоритму преобразуется в регулирующее воздействие  $p_{\text{вых}}$ , поступающее на пневматический исполнительный механизм и далее на регулирующий орган, изменяющий расход входного потока  $Q_{\text{вх}}$ . При переключении режима работы с автоматического на ручное управление на устройство регулирующее поступает командный сигнал  $p_{\text{к}}$  для отключения выходного сигнала  $p_{\text{вых}}$  от исполнительного механизма и подачи управляющего воздействия от ручного задатчика, расположенного на станции управления.

Приборы и устройства комплекса «Старт» имеют приспособления для монтажа на щите управления, и для каждой АСР в соответствии с технологическим процессом отводится определенное место. При большом количестве АСР появляются проблемы с точки зрения обзора всех приборов контроля и своевременного реагирования на нештатные ситуации. В этих случаях предпочтение отдается комплексу «Центр», который позволяет за счет использования системы централизованного контроля избавить оператора от избыточной информации и создавать компактные щиты управления с большой долей заводского монтажа.

### 9.3. Электрические системы

В ряде химических производств, в теплоэнергетике и промышленности строительных материалов широкое распространение получили электрические и электронные системы регулирования, содержащие средства контроля и управления технологическими параметрами, а также функциональные устройства, предназначенные для выполнения простейших операций.

**Комплекс «Контур»** состоит из четырех групп приборов, построенных на базе измерительных и регулирующих субблоков:

1. **Приборы регулирующие типа Р25** предназначены для формирования пропорционально-интегрального закона регулирования в комплексе с электрическим исполнительным механизмом в пульсирующем режиме (см. рис. 9.16).

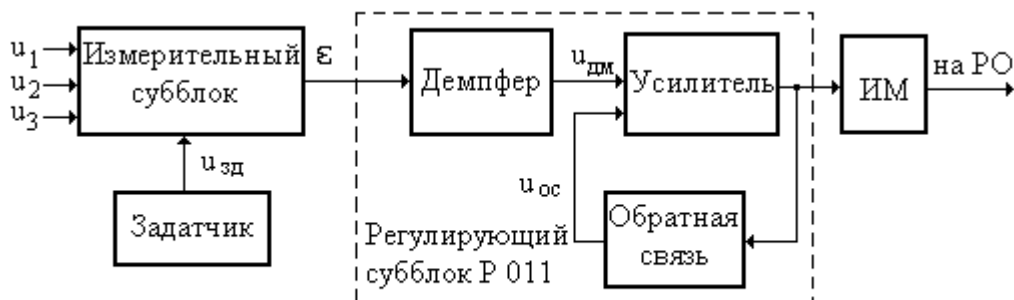


Рис. 9.16. Схема прибора регулирующего Р25

В качестве первичных преобразователей регулируемых параметров используются приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями, термоэлектрические преобразователи и электрические термометры сопротивления. Их выходные сигналы поступают на вход соответствующего субблока, где после масштабирования сравниваются с заданным значением регулируемого параметра  $u_{зд}$ , формируемого ручным задатчиком. Нормированный сигнал рассогласования  $\varepsilon$  проходит через демпфер (RC-цепочку, в динамическом отношении подобную аperiодическому звену первого порядка) для сглаживания пульсаций и поступает на вход усилителя с большим коэффициентом усиления, охваченного инерционной отрицательной и жесткой положительной обратными связями. Выходной сигнал с усилителя подается на исполнительный механизм с постоянной скоростью. В результате субблок Р 011 вместе с электрическим исполнительным механизмом, работающим в импульсном режиме, в динамическом отношении подобен ПИ-регулятору с передаточной функцией:

$$W_p(p) = \frac{1}{T_{дм}p + 1} k_{п-63} \left(1 + \frac{1}{T_{и}p}\right), \quad (9.42)$$

где  $T_{дм}$  – постоянная времени демпфирующего звена;  $k_{п-63}$  – коэффициент передачи субблока с учетом использования электрического исполнительного механизма, время полного хода которого составляет 63 с;  $T_{и}$  – постоянная интегрирования.

Соответствующий измерительный субблок и регулирующий субблок монтируются в одном корпусе. На передней панели прибора расположены органы настройки регулятора, формирования задания, индикатор рассогласования и т. д.

Например, для построения системы регулирования расхода выбираем расходомер переменного перепада давления (диафрагма 1, дифференциальный манометр с дифференциально-трансформаторным датчи-

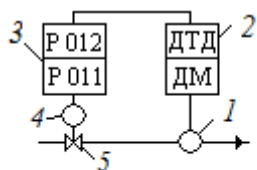


Рис. 9.17. Схема АСР расхода

ком 2), прибор регулирующий 3 типа Р25.1 с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости 4 и клапан регулирующий 5 (рис. 9.17). Показывающие и регистрирующие приборы устанавливаются независимо от АСР.

## 2. Приборы корректирующие типа К15

предназначены для формирования непрерывного корректирующего сигнала по пропорционально-интегральному или по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону. В качестве первичных преобразователей параметров используются приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями, термоэлектрические преобразователи и электрические термометры сопротивления. Выходной сигнал – 0–10 В и 0–5 мА постоянного тока.

3. **Приборы корректирующие типа К16** предназначены для непрерывного преобразования входного сигнала по дифференциальному, интегральному, апериодическому или пропорциональному закону. В качестве первичных преобразователей регулируемых параметров используются приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями и термоэлектрические преобразователи.

4. **Приборы корректирующие типа К26** предназначены для преобразования непрерывного входного сигнала в дискретный. В качестве первичных преобразователей параметров используются приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями и термоэлектрические преобразователи.

**Комплекс приборов и устройств «Контур-2»** включает 14 типов многофункциональных регулирующих приборов типа РС29 с импульсным выходом и два трехпозиционных усилителя типа У29. Для измерения входного параметра используются первичные преобразователи с унифицированным сигналом постоянного тока, термоэлектрические преобразователи, электрические термометры сопротивления, дифференциально-трансформаторные преобразователи. Регулирующие приборы предназначены для формирования пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования совместно с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости.

**Агрегатный комплекс электрических средств регулирования АКЭСР второй очереди** предназначен для реализации автоматических систем регулирования, работающих в импульсном режиме. В составе комплекса имеются различные регулирующие и функциональные блоки.

**Регулирующие блоки типа РП4** предназначены для формирования пропорционального, пропорционально-интегрального и пропорционально-интегрально-дифференциального законов регулирования в ком-

плекте с электрическим исполнительным механизмом с постоянной скоростью. Входные сигналы от первичных преобразователей могут быть в виде нормированных сигналов постоянного тока, изменения сопротивления термометров сопротивления, изменения термоЭДС термоэлектрических преобразователей, изменения взаимной индуктивности преобразователей сигналов и т. д.

Комплекс представлен большим ассортиментом **функциональных блоков**: БЗИ – блок задания интегрирующий; БДС – блок динамической связи; БСС – блок суммирования и сигнализации; БСД – блок суммирования и демпфирования; БНП-2 – блок нелинейных преобразований; БСЛ-2 – блок селектирования; БВО-2 – блок вычислительных операций; ПДВ-2 – программный датчик времени; ППЭ-2 – пневмоэлектрический преобразователь; РЗД-12 и РЗД-22 – задатчики ручные; ПБР-2М и ПБР-3А – пускатели бесконтактные реверсивные.

**Комплекс регулирующих и функциональных блоков на микроэлектронной базе «Каскад-2»** предназначен для реализации автоматических систем регулирования, работающих в аналоговом и импульсном режиме.

**Блоки регулирующие типа Р17** с непрерывным выходным сигналом (0–5, 0–20, 4–20 мА и 0–10 В постоянного тока) и Р27 с импульсным выходным сигналом (24 В постоянного пульсирующего тока или изменение состояния выходных ключей, обеспечивающих сигналы +10 или –10 В постоянного тока) предназначены для формирования пропорционального, пропорционально-интегрального и пропорционально-интегрально-дифференциального законов регулирования. Кроме того, регулирующие блоки типа Р17 позволяют формировать пропорционально-дифференциальный закон регулирования. Блок регулирующий Р28 обеспечивает автоматическую аналоговую или дискретную трехступенчатую автоподстройку коэффициента передачи и постоянной времени интегрирования. Входные сигналы от первичных преобразователей могут быть в виде нормированных сигналов постоянного тока, изменения сопротивления термометров сопротивления, изменения термоЭДС термоэлектрических преобразователей, изменения взаимной индуктивности преобразователей сигналов и т. д.

**Функциональные блоки** позволяют выполнять большой набор операций по преобразованию сигналов: А05 – блок суммирования и ограничения; А06 – блок ограничения и размножения сигналов; А35 – блок вычислительных операций; Д07 – блок интегрирования; Л03 – блоки аналого-релейного преобразования; Д05 – блоки динамических преобразований; Д06 – блок динамического преобразования с автоподстройкой; Н05 – блок нелинейных преобразований.

**Программируемые микропроцессорные контроллеры** стали при-



меняться для управления технологическими процессами с целью улучшения качества управления за счет возможности изменения структуры АСР или законов регулирования. Создание системы управления сложным технологическим процессом с большим количеством локальных систем достигается использованием процедур технологического программирования, когда за счет программной коммутации из небольшого числа стандартных алгоритмов или их комбинаций формируются локальные системы различной сложности. В этом случае сокращаются сроки разработки и внедрения систем управления.

Для автоматизации непрерывных и непрерывно-дискретных процессов в химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности используются регулирующие микропроцессорные контроллеры (Ремиконты). В состав Ремиконтов (см. рис. 9.18) входят устройства ввода информации в виде аналого-цифровых и дискретно-цифровых преобразователей, преобразующих нормированные сигналы (64 аналоговых и 128 дискретных), полученные с помощью измерительных преобразователей, в цифровую информацию, подаваемую в условное поле, состоящее из ячеек. Используя процедуры технологического программирования, в ячейках размещаются и соединяются между собой типовые алгоритмы, реализующие локальные системы регулирования. Типовые алгоритмы хранятся в библиотеке алгоритмов. Всего их 25: аналоговое или импульсное ПИД-регулирование, дифференцирование, интегрирование, программное изменение сигнала, суммирование, умножение, деление, извлечение квадратного корня, селектирование и т. д.

Информация в Ремиконте обрабатывается в реальном масштабе времени циклически и подается на устройства вывода информации (цифро-импульсные, цифро-аналоговые и цифро-дискретные преобразователи). Выходные сигналы Ремиконта управляют электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости, пневматическими пропорциональными исполнительными механизмами с использованием электропневматических преобразователей, а также реле и индикаторами. Средства связи с оператором обеспечивают выполнение процедур технологического программирования, возможность наблюдения за ходом технологического процесса и оперативного управления процессом. Для управления дискретными и многостадийными технологическими процессами используются логические микропроцессорные контроллеры *Ломиконты*.

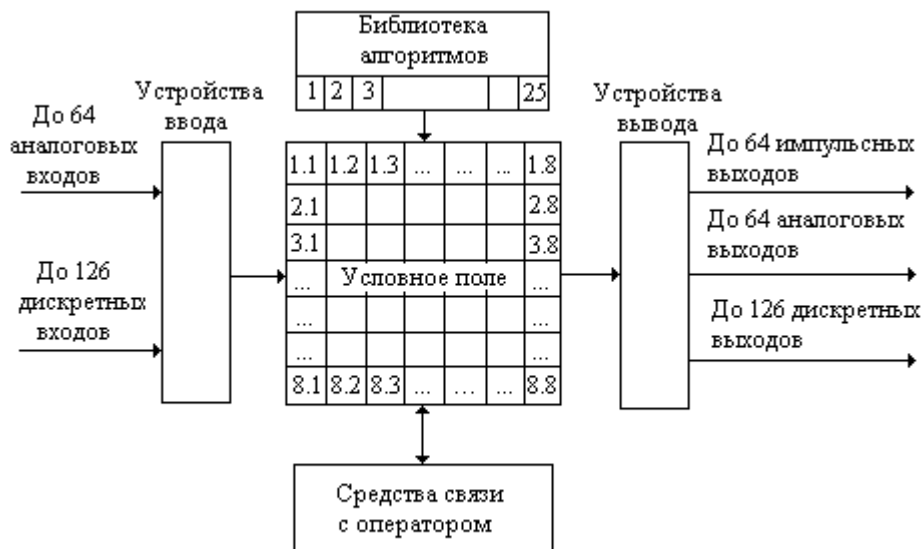


Рис. 9.18. Функциональная структура Ремиконта

## 10. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Автоматизированные системы управления в зависимости от объекта управления подразделяют:

- на автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП);
- автоматизированные системы управления производствами;
- автоматизированные системы управления предприятиями.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) принято относить к классу человеко-машинных систем, когда решения по управлению технологическим процессом вместе с техническими средствами (вычислительный комплекс) принимает оператор-человек.

### 10.1. Функции АСУ ТП

Функции АСУ ТП – это совокупность действий системы, направленных на достижение одной из целей управления. **Функции** АСУ ТП делятся на **информационные, управляющие и вспомогательные**, выполняемые соответствующими подсистемами.

В результате выполнения **информационных функций** оператору, управляющему устройству или внешней системе предоставляется информация о ходе технологического процесса. К основным информаци-

онным функциям АСУ ТП относятся: первичная обработка информации о текущем состоянии объекта управления; непрерывная проверка соответствия параметров процесса допустимым значениям; информирование персонала в случае возникновения несоответствия; измерение и регистрация параметров по вызову оператора; расчет показателей качества продукции; расчет технико-экономических показателей процесса; обнаружение и сигнализация наступления опасных ситуаций и т. д.

Выполнение *управляющих функций* обеспечивает расчет и реализацию управляющих воздействий: стабилизацию технологических параметров относительно заданных значений; программное изменение режима процесса; защиту оборудования от аварий; формирование и реализацию управляющих воздействий, обеспечивающих достижение и соблюдение оптимального режима; управление пусками и остановом агрегатов и т. д.

*Вспомогательные функции* обеспечивают решение внутрисистемных задач.

## 10.2. Разновидности АСУ ТП

Принимая за признак степень участия человека в принятии решения по управлению технологическим процессом, можно предложить следующую *классификацию АСУ ТП*:

а) *АСУ ТП, функционирующие без вычислительного комплекса* (рис. 10.1) и выполняющие основные функции, к которым относятся: контроль параметров технологического процесса; стабилизация технологического процесса относительно заданного технологическим регламентом режима; программное управление; сигнализация отклонений параметров за критические значения и защита оборудования от аварий. Решения по управлению технологическим процессом принимает человек, а реализуются эти решения с помощью локальных АСР и устройств логического управления.

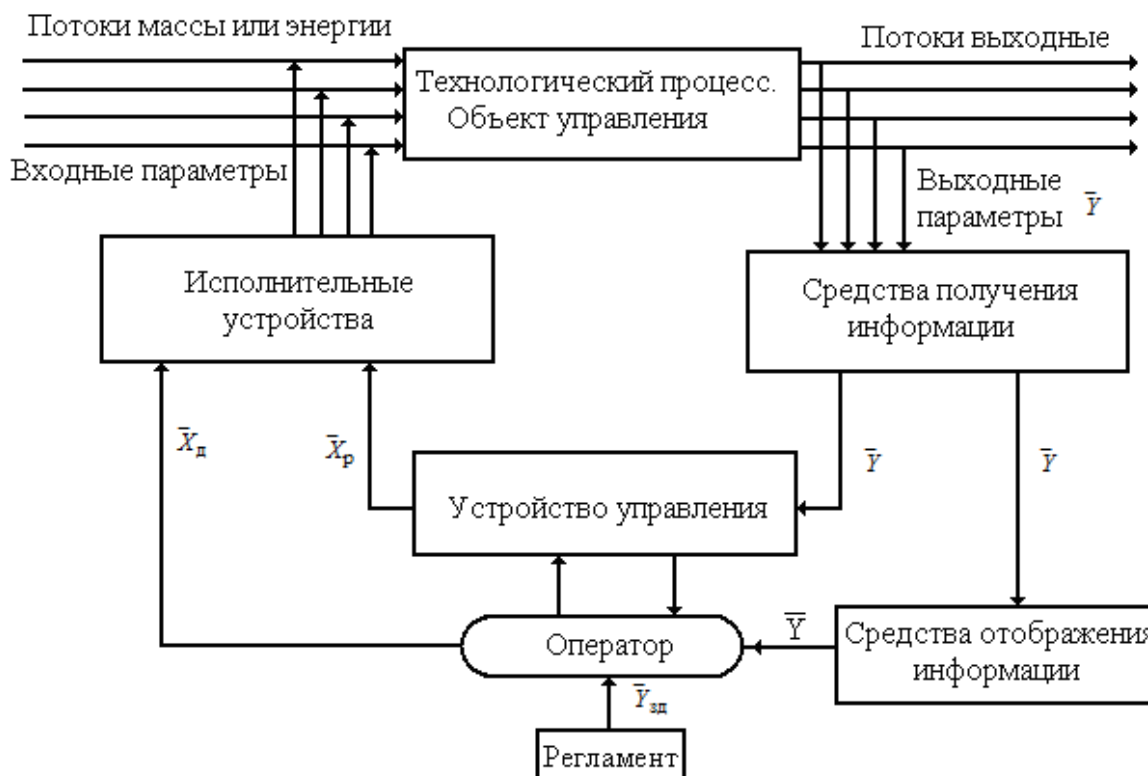


Рис. 10.1. Схема АСУ ТП, функционирующей без ВК

Средства получения информации измеряют выходные параметры  $\bar{Y}$  и преобразуют в нормированные сигналы, поступающие в устройства управления и на средства отображения информации для наблюдения оператором и регистрации. Оператор, в соответствии с требованиями технологического регламента, устанавливает заданные значения регулируемых параметров  $\bar{Y}_{зд}$  на регуляторах локальных систем, формирующих регулирующие воздействия  $\bar{X}_p$  для перемещения исполнительных устройств, в свою очередь изменяющих потоки массы или энергии в объект. Оператор имеет возможность дистанционного воздействия  $\bar{X}_d$  на исполнительные устройства.

**б) АСУ ТП, использующие вычислительный комплекс для выполнения информационных функций** (рис. 10.2): централизованного контроля параметров технологического процесса; вычисления комплексных технических и технико-экономических показателей; контроля работы и состояния оборудования и т. п. В этом случае функции оператора сохраняются, но повышается количественно и качественно объем информации о функционировании объекта управления.

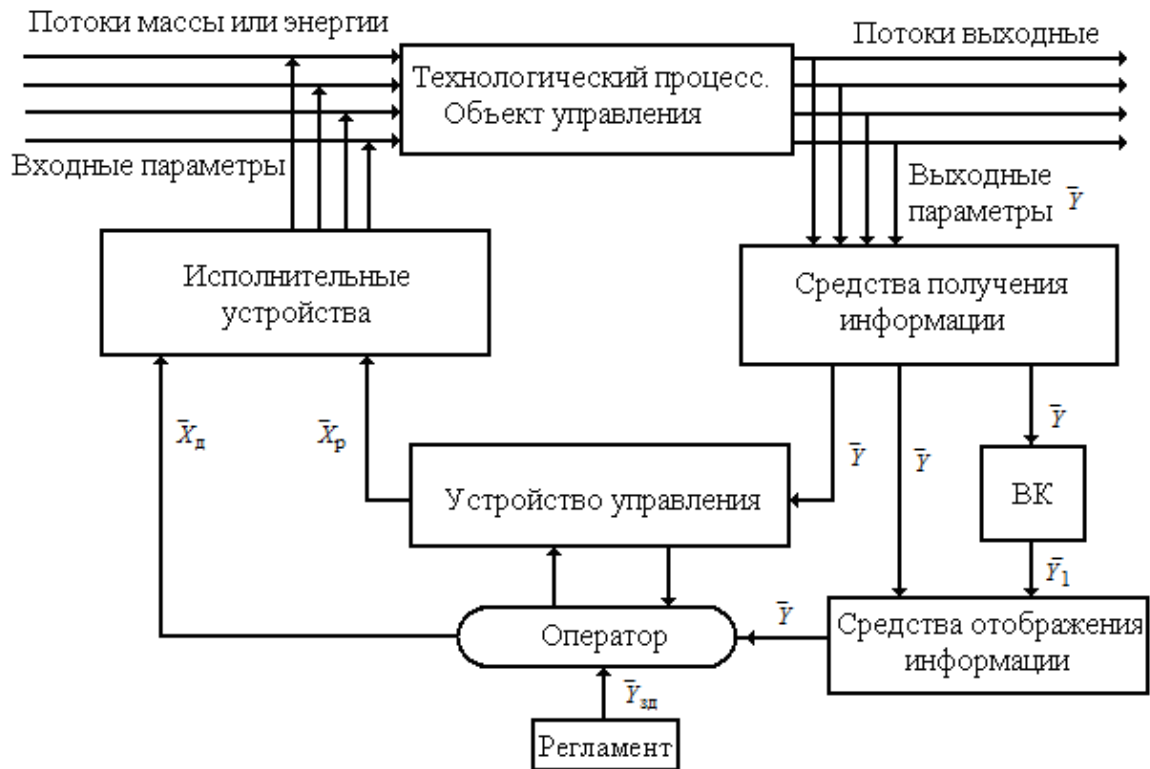


Рис. 10.2. Схема АСУ ТП, функционирующая с использованием ВК для выполнения информационных функций

в) *АСУ ТП, использующие вычислительный комплекс для формирования нескольких оптимальных управлений в режиме «советчика»* (см. рис. 10.3). В соответствии с заложенными в ВК вычислительными процедурами осуществляется поиск оптимальных решений с выдачей советов оператору.

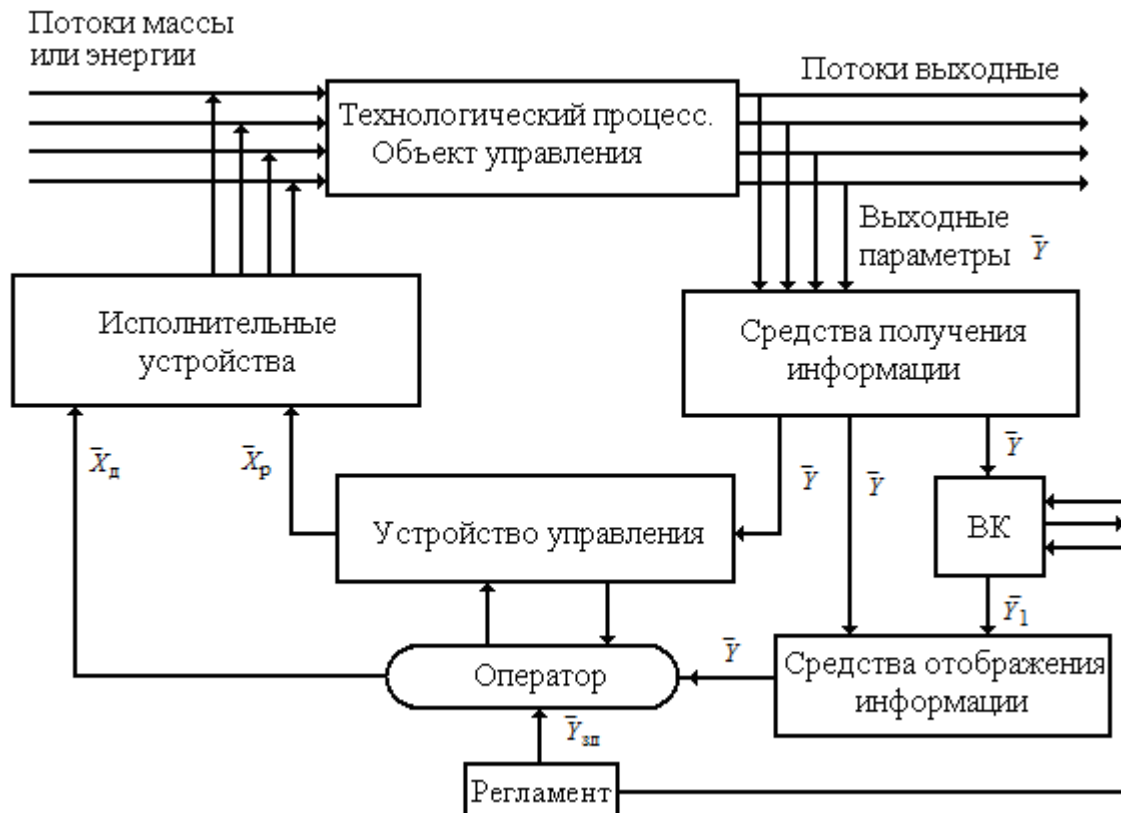


Рис. 10.3. Схема АСУ ТП, использующая ВК для формирования нескольких оптимальных решений в режиме «советчика»

Оператор выбирает из предложенных оптимальных решений одно с учетом дополнительной информации, поступающей от вышестоящих инстанций. В данном случае принятое оператором решение не может ухудшить эффективность технологического процесса, а обязательно улучшит, так как оператор выбирал решение из набора предложенных вычислительным комплексом оптимальных решений.

Предусматривается передача и получение информации от вышестоящих АСУ.

**г) АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции центрального управляющего устройства (супервизорное управление).**

Вычислительный комплекс (см. рис. 10.4) на основе полученной информации о состоянии объекта вырабатывает управления, поступающие на локальные системы в качестве заданий. При этом структура системы управления не меняется, так как сохраняются локальные системы регулирования и системы логического управления, выполненные на базе комплексов средств автоматизации. Система обеспечивает автоматическое поддержание технологического процесса в околооптимальной области.

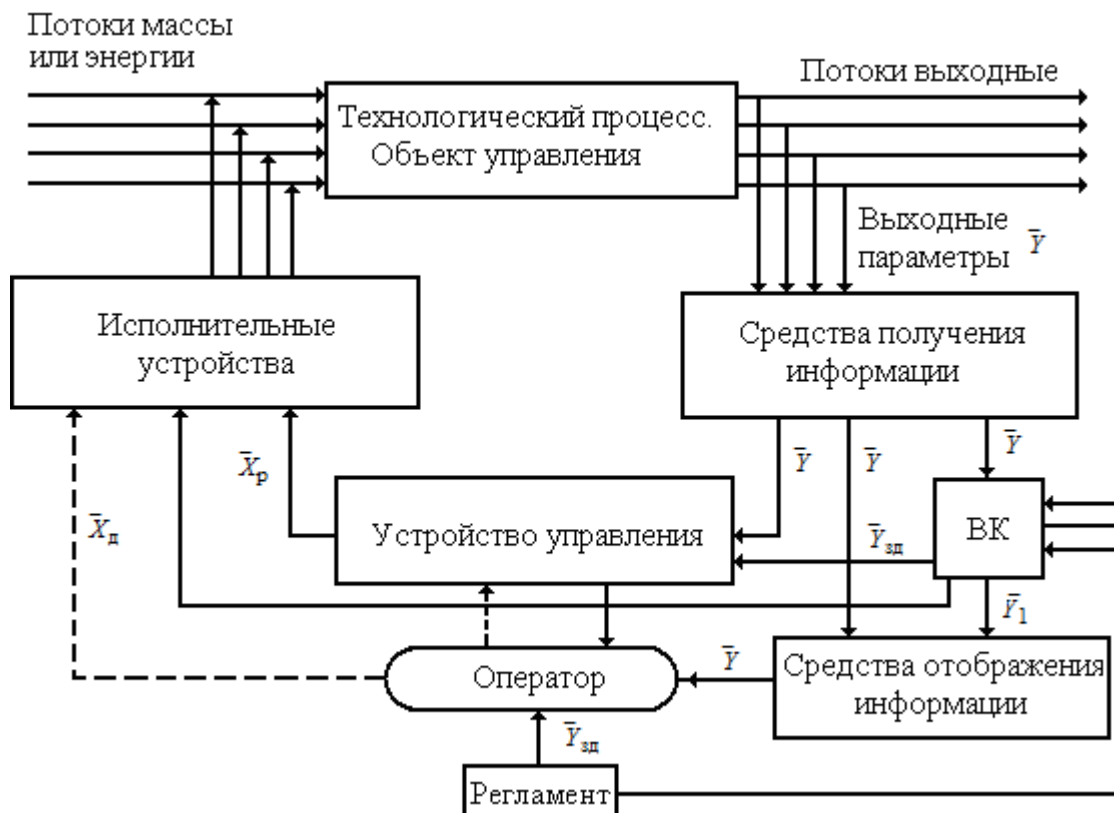


Рис. 10.4. Схема АСУ ТП с ВК, выполняющим функции супервизорного управления

Оператор выполняет функции контроля за ходом процесса управления и может вводить корректирующие воздействия при изменении условий функционирования системы.

**д) АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции непосредственного цифрового управления.**

В вычислительном комплексе на программном уровне формируется полная структура системы управления технологическим процессом и размещаются программные средства, позволяющие выполнять все функции управления (см. рис. 10.5). Вычислительный комплекс рассчитывает управляющие воздействия  $\bar{X}_p$ , передаваемые на исполнительные устройства. Структура системы управления и алгоритмы управления могут изменяться внесением изменений на программном уровне. Это особенно удобно при использовании локальных систем каскадного и многосвязного регулирования. Вычислительный комплекс позволяет реализовывать все функции, включая выполнение операций пуска и останова оборудования.

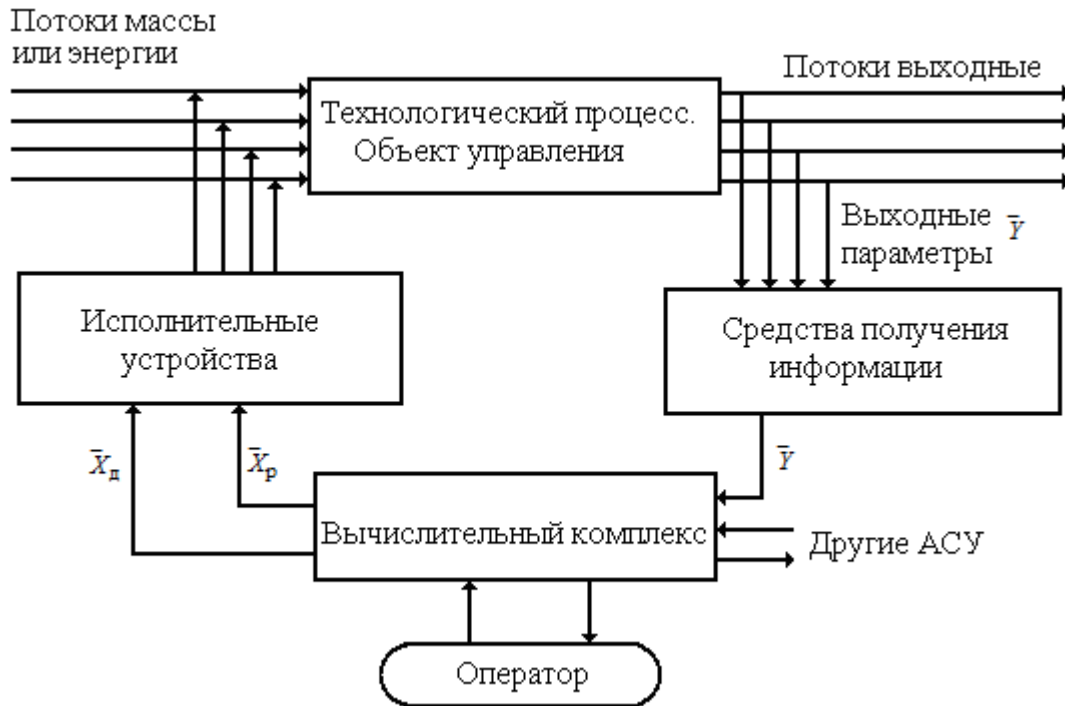


Рис. 10.5. Схема АСУ ТП с ВК, выполняющим функции непосредственного цифрового управления

С целью управления сложными технологическими процессами в АСУ ТП можно использовать несколько вычислительных комплексов, объединенных в одну вычислительную сеть. **Такие АСУ ТП обычно называют распределенными.** За счет распределения функций управления между отдельными ВК можно увеличить надежность АСУ ТП, осуществляя самодиагностику технических средств, обнаружение неисправностей, автоматическое резервирование и т. п. В распределенных АСУ ТП для управления отдельными технологическими параметрами широко используются микропроцессорные контроллеры, программируемые на SCADA-уровне.

### 10.3. Состав АСУ ТП

Для обеспечения функционирования АСУ ТП в её состав должны входить:

1. Оперативный персонал.
2. Информационное обеспечение.
3. Математическое обеспечение.
4. Техническое обеспечение.
5. Организационное обеспечение.
6. Программное обеспечение.
7. Метрологическое обеспечение.
8. Лингвистическое обеспечение.



**Оперативный персонал** совместно с техническим обеспечением на основе имеющейся у них информации принимают и реализуют решения по управлению.

Для реализации взаимодействия оперативного персонала и технического обеспечения служит **информационное обеспечение**, содержащее совокупность сведений о потоках и массивах информации, используемых для характеристики информации о состоянии системы, в том числе системы кодирования информации, формы документов, нормативно-справочную информацию и т. д.

**Математическое обеспечение** содержит математические модели и алгоритмы, используемые для управления.

**Техническое обеспечение** включает средства получения, преобразования, передачи и отображения информации, а также средства автоматизации, вычислительные комплексы и т. д.

**Организационное обеспечение** включает в себя совокупность документов, регламентирующих работу персонала.

**Программное обеспечение** содержит все программные средства, обеспечивающие функционирование АСУ ТП: операционную систему для управления программами; функциональные программы; управление данными (система управления базой данных); программы связи с оператором и т. д.

**Метрологическое обеспечение** предназначено для обеспечения заданной точности измерения технологических параметров и осуществления метрологической аттестации средств измерения.

**Лингвистическое обеспечение** содержит описание языковых средств общения оперативного персонала с вычислительными комплексами с использованием текстовых сообщений, видеокадров, подсказок, меню, помощи.

#### 10.4. Современная реализация АСУ ТП

При реализации современных АСУ ТП учитываются уровень развития средств контроля, автоматизации, вычислительной техники и программного обеспечения, особенности объекта управления. Например, современные технологии измерения и управления широко используют интеллектуальные датчики и исполнительные механизмы, имеющие встроенные микропроцессоры, которые обрабатывают информацию по месту измерения; проводят диагностику работы исполнительных механизмов. При этом разгружаются станции управления АСУ ТП и каналы связи, повышая оперативность управления. Алгоритмы управления отдельными технологическими параметрами реализуются с помощью микропроцессорных контроллеров (Р-130, КРОСС, ТРАССА, Т-

МК1, ЕЛЕСИ и т. д.), программируемых на SCADA-уровне. Применение SCADA-технологий позволяет достигнуть высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации.

Разработка, отладка и исполнение программ управления локальными контроллерами осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения [пакеты типа ISAaGRAF (CJ International France), InControl (Wonderware, USA), Paradym 31 (Intellution, USA)].

На верхнем уровне АСУ ТП могут быть использованы одна или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. Здесь же может быть размещен сервер базы данных, рабочие места для специалистов и т. д. В качестве рабочих станций часто используют ПЭВМ типа IBM PC различных конфигураций. Станции управления предназначены для отображения хода технологического процесса и оперативного управления.

По изложенному выше принципу реализована АСУ ТП мини-НПЗ, на котором путем атмосферной перегонки нефти получают мазутную, дизельную и бензиновую фракции.

АСУ ТП выполняет следующие основные функции:

- автоматическое регулирование технологических параметров процесса переработки нефти;
- автоматическую защиту технологического оборудования;
- оповещение операторов об аварийных ситуациях;
- оперативное отображение состояния технологических процессов в виде мнемосхем;
- управление оборудованием по заданному алгоритму;
- ведение журнала аварий и т. д.

В структуре объекта управления находятся: печи подогрева нефти; ректификационные колонны и теплообменники; технологическая насосная станция; резервный парк нефти и нефтепродуктов; ёмкости химреагентов; насосная станция отгрузки и т. д.

Система представляет собой распределенный комплекс, состоящий из автономных контроллеров, связанных между собой и системой информационного обеспечения оператора технологической сетью. Каждый технологический узел системы, оснащенный контроллером, представляет интеллектуальную единицу, способную функционировать в автоматическом режиме.

## 11. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Проблемы проектирования систем автоматизации технологических процессов возникают при создании новых и реконструкции действующих производств. Проектирование систем автоматизации новых производств включает пять стадий: разработку технического задания; эскизную разработку; разработку технического проекта; разработку рабочего проекта; внедрение системы и анализ функционирования. При проектировании систем автоматизации реконструируемых производств используются материалы ранее разработанных проектов автоматизации с учетом современных достижений в проектировании, математическом моделировании, аппаратурном оформлении и т. п.

На *стадии разработки технического задания* формулируются цели и критерии качества функционирования системы; выполняется исследование технико-экономических показателей функционирования системы; определяется структура объекта управления; определяются входные воздействия, выходные параметры, возмущающие воздействия; строятся математические модели; выбираются параметры, подлежащие сигнализации для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности функционирования производства; выполняются исследования статических характеристик объекта по каналам управления и возмущения.

На *стадии эскизной разработки проекта* выбираются критерии оптимального управления; выбираются методы решения задач оптимального управления; разрабатывается функциональная и алгоритмическая структуры системы управления; предварительный выбор средств контроля и автоматизации; выполняется предварительный расчет технико-экономической эффективности системы управления.

На *стадии разработки технического проекта* уточняются математические модели и задачи оптимального управления; уточняются функциональная и алгоритмическая структуры системы; выбирается комплекс технических средств управления и т. д.

На *стадии разработки рабочего проекта* создается вся техническая и проектно-сметная строительная документация; составляются сметы на оборудование и монтаж; разрабатываются задания генеральному проектировщику (смежникам или заказчикам).

Для ввода в действие системы управления технологическим производством необходимо пройти следующие этапы: обучение персонала; строительно-монтажные работы; комплектация системы техническими и другими средствами управления; пусконаладочные работы; опытная эксплуатация; приемные испытания; приемка системы в эксплуатацию,

на основании которой составляется акт о вводе системы управления в действие. Анализируя фактическую эффективность системы управления, делают выводы об эффективности принятых решений на стадии проектирования.

Все решения по управлению процессами сводятся в пояснительную записку к проекту и отображаются на принципиальных схемах. Схемы автоматизации выполняются в соответствии с ГОСТ 2.784–96 «Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические. Элементы трубопроводов» и ГОСТ 21.404–85 «Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах» [4].

Технологическая схема разворачивается, как правило, слева направо в полном или сокращенном виде. Аппараты на схеме изображаются в виде контуров с указанием их названия или указывается номер. Толщина линий при изображении контура аппарата должна быть больше, чем у трубопроводов, изображаемых в виде сплошных линий. Направление движения среды в трубопроводе указывается стилизованной стрелкой. Графическое изображение приборов, средств автоматизации и линий связи должны соответствовать требованиям ГОСТ 21.404–85, который устанавливает упрощенный и развернутый методы построения условных обозначений (см. Прил.). Далее схемы автоматизации типовых технологических процессов будут строиться с использованием упрощенного метода.

### 11.1. Регулирование процессов перемещения жидкостей и газов

Для перемещения жидкостей используются центробежные и поршневые насосы. Система автоматического регулирования должна обеспечить заданное значение расхода жидкости. При использовании центробежного насоса  $I$  расход жидкости изменяется за счет изменения гидравлического сопротивления трубопровода на нагнетающей стороне (рис. 11.1). Система регулирования расхода  $I$  измеряет текущее значение расхода жидкости, сравнивает с заданным значением, преобразует сигнал рассогласования по определенному закону и с помощью исполнительного механизма перемещает клапан регулирующий  $2$ , изменяя гидравлическое сопротивление трубопровода до тех пор, пока текущее значение расхода

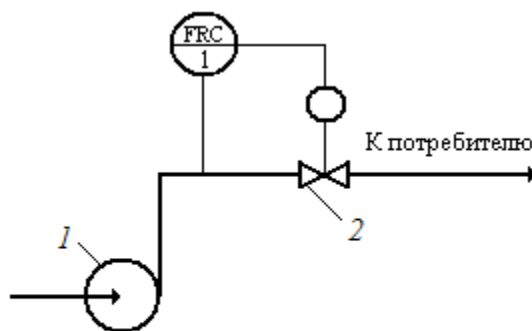


Рис. 11.1. Схема регулирования расхода жидкости

жидкости не будет отличаться от заданного значения на величину меньше  $\Delta$ .

При использовании поршневого насоса расход жидкости изменяется либо за счет изменения расхода пара в паровую машину (рис. 11.2, а), либо за счет изменения перепуска жидкости из нагнетательной линии во всасывающую (рис. 11.2, б).

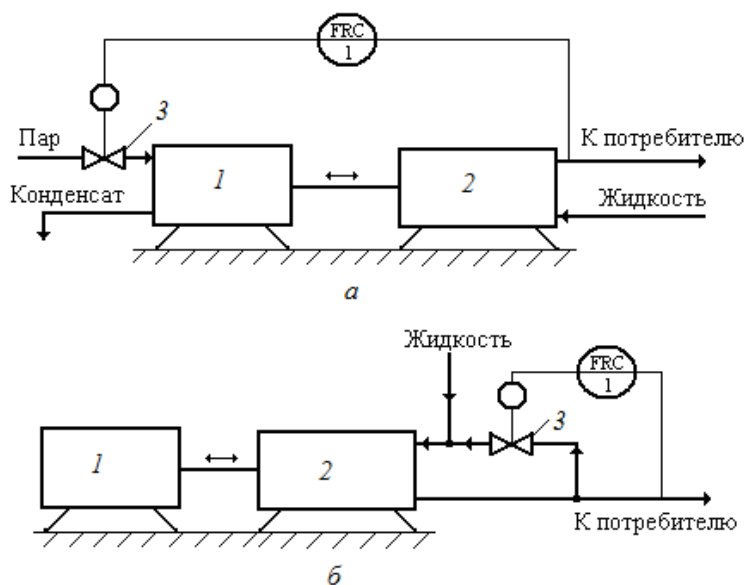


Рис. 11.2. Схемы регулирования расхода жидкостей

Если приводом поршневого насоса 2 служит паровая машина 1, то имеется возможность плавного регулирования производительности за счет изменения скорости паровой машины, зависящей от расхода пара. Если приводом поршневого насоса 2 служит асинхронный электрический двигатель 1 с постоянным числом оборотов, то расход жидкости потребителю, который не должен превышать производительность насоса, поддерживается с помощью клапана регулирующего 3, установленного на обратной линии.

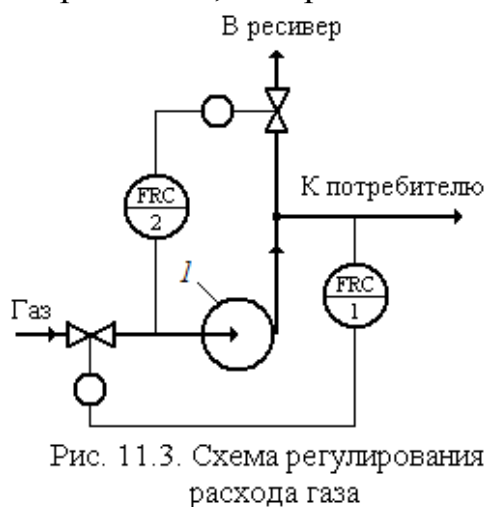


Рис. 11.3. Схема регулирования расхода газа

Для перемещения газов используются центробежные и поршневые компрессоры. Регулирование расхода газа потребителю осуществляется за счет изменения гидравлического сопротивления всасывающей линии центробежного компрессора 1 (рис. 11.3) и обеспечения защиты от помпажа (изменение направления движения газа). Чтобы предупредить появление условий для возникновения помпажа, система 2 обеспечивает заданное значение расхода

газа через компрессор, сбрасывая газ в ресивер. Регулирование расхода газа потребителю, когда газ перемещается поршневым компрессором, осуществляется за счет перепуска части газа из нагнетательной линии во всасывающую (см. рис. 11.2, б).

## 11.2. Регулирование тепловых процессов

Процессы передачи тепла имеют место в большинстве химико-технологических процессов и осуществляются с помощью теплообменников. Система регулирования теплообменника должна обеспечить поддержание заданного значения температуры выходного потока вещества за счет изменения расхода потока теплоносителя.

**В теплообменниках смешения** смешиваются два потока вещества, один из которых  $G_2$  нагревается за счет тепла второго потока  $G_1$  (рис. 11.4). Выбор системы регулирования температуры зависит от многих факторов, поэтому рассмотрим несколько вариантов.

Если объем теплообменника небольшой и уровень возмущений низкий, то есть температура и расход нагреваемой среды перед теплообменником мало изменяется, то заданное качество регулирования температуры выходного потока можно достичь за счет изменения расхода греющего теплоносителя  $G_1$  (рис. 11.4), используя замкнутую одноконтурную АСР, работающую по принципу отклонения. Принятое решение желательно проверить путем моделирования системы на ПВМ.

Если нагреваемая среда поступает в теплообменник с постоянной температурой, то можно использовать разомкнутую систему регулирования соотношения расходов (см. рис. 11.5, а). Когда нагреваемый поток поступает в теплообменник с переменной температурой, то можно воспользоваться разомкнутой системой регулирования соотношения расходов с коррекцией по температуре нагреваемой среды на входе в теплообменник (см. рис. 11.5, б) или каскадной АСР (см. рис. 11.6, а). В последнем случае коррекция коэффициента соотношения расходов системы 1 осуществляется системой 2 по температуре выходного потока.

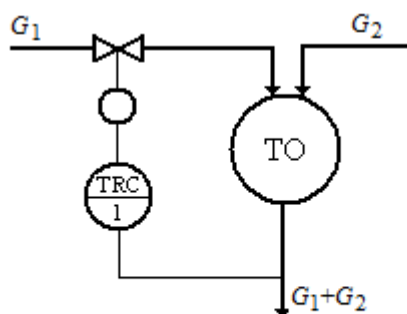


Рис. 11.4. Регулирование ТО смешения с помощью одноконтурной АСР

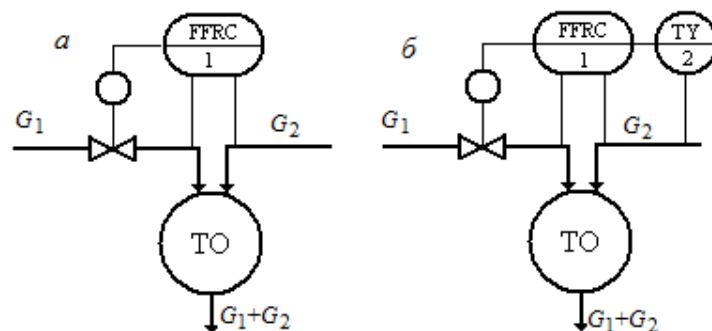


Рис.11.5. Регулирование ТО смешения с помощью АСР соотношения

Преимущество этой АСР состоит в том, что она может быть реализована на серийных промышленных регуляторах. При использовании комбинированных систем (рис. 11.6, б) динамический компенсатор 2, выполненный на базе микропроцессорного устройства, по уравнению теплового баланса на основе результатов измерения расхода и температуры нагреваемой среды на входе в теплообменник рассчитывает поправку на задание регулятору температуры системы 1.

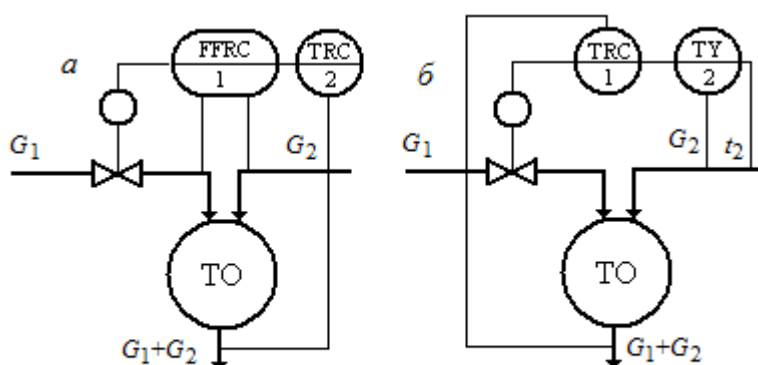


Рис. 11.6. Регулирование ТО смешения с помощью каскадной и комбинированной АСР

**В кожухотрубных парожидкостных теплообменниках** передача тепла осуществляется через поверхность теплообмена, разделяющую нагреваемую среду и греющий теплоноситель. Насыщенный пар поступает в межтрубное пространство и конденсируется, отдавая тепло поверхности труб. За счет теплопередачи тепло передается на внутреннюю поверхность труб и нагревает среду, протекающую по трубам.

Наиболее часто процесс регулирования температуры нагреваемой среды на выходе теплообменника осуществляется с помощью замкнутой одноконтурной АСР (см. рис. 11.7, а), изменяющей расход пара. Если давление в паровой магистрали изменяется, то это приводит к нежелательному изменению расхода пара через клапан регулирующий. Чтобы исключить этот вид возмущения, применяется каскадная схема регулирования рас-

хода пара  $l$  с коррекцией по температуре нагреваемой среды на выходе (рис. 11.7, б).

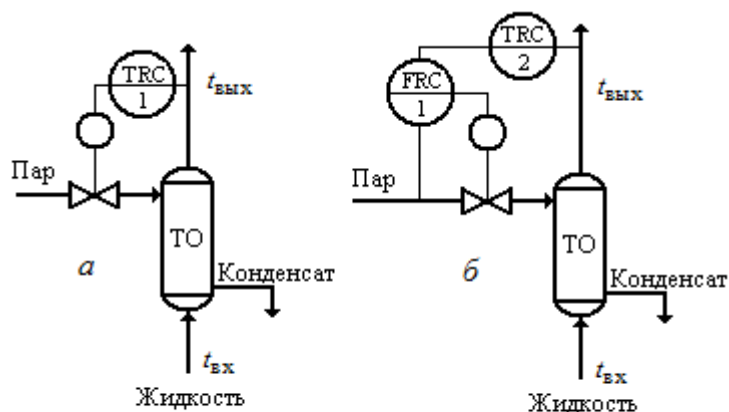


Рис. 11.7. Схемы регулирования кожухотрубных теплообменников

При значительных изменениях расхода нагреваемой жидкости применяют каскадную систему регулирования соотношения расходов греющего пара и нагреваемой среды с коррекцией по температуре нагреваемой среды на выходе (рис. 11.8, а). При больших объемах нагреваемой среды высокое качество регулирования температуры можно достичь за счет байпасирования части потока (рис. 11.8, б). Система регулирования  $1$  обеспечивает постоянное значение температуры жидкости после теплообменника ( $t'_{\text{вых}} > t_{\text{вых}}$ ), а система регулирования  $2$  обеспечивает постоянное значение температуры на выходе за счет смешивания нагретой и холодной жидкости.

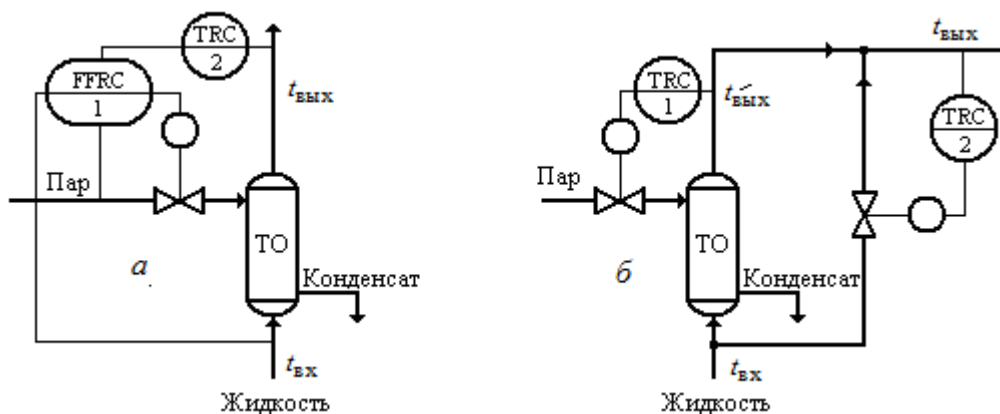


Рис. 11.8. Схемы каскадного регулирования и с байпасированием части потока

Управление **процессом испарения жидкостей** имеет целью поддержать материальный баланс по технологическому потоку: количество испарившейся жидкости должно быть равно количеству поступающей



в испаритель жидкости. Достигается это путем поддержания заданного уровня жидкости в аппарате при постоянном давлении пара над поверхностью испарения.

Регулятор уровня системы 1 (рис. 11.9, а) изменяет подачу пара в межтрубное пространство испарителя с целью сохранения уровня испаряемой жидкости. Регулятор давления системы 2 изменяет гидравлическое сопротивление паропровода, по которому отводится технологический пар. При значительном колебании расхода жидкости применяется каскадная система регулирования соотношения расходов пара и испаряемой жидкости с коррекцией по уровню (рис. 11.9, б).

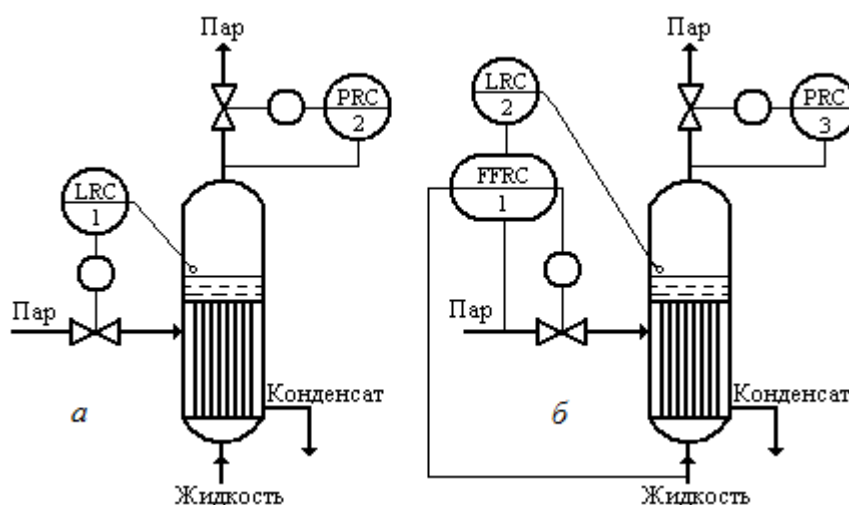


Рис. 11.9. Схемы регулирования испарителей

**Для нагрева жидкостей и газов до высоких температур используют трубчатые печи.** Тепло, отдаваемое топливом при сгорании, передается нагреваемой среде, проходящей по трубам. Система регулирования должна обеспечить постоянную температуру нагреваемой среды на выходе из печи при минимальном расходе топлива. Для сжигания топлива в печь подается воздух в объеме, обеспечивающем заданную полноту сгорания.

Простейшая система управления процессом нагрева (рис. 11.10, а) содержит три локальных АСР: регулятор системы 1 обеспечивает поддержание температуры среды на выходе печи путем изменения расхода топлива; регулятор соотношения системы 2 поддерживает заданное соотношение расхода топлива и воздуха путем изменения расхода воздуха; регулятор системы 3 поддерживает разрежение в печи путем изменения гидравлического сопротивления газопровода с целью предотвращения попадания дымовых газов в атмосферу. С целью оптимизации расхода топлива (рис. 11.10, б) используется каскадная система регулирования соотношения расхода топлива и воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах. При значительных колебаниях температуры нагреваемой сре-

ды на входе в печь с целью опережающего формирования регулирующего воздействия используется комбинированная система регулирования температуры с вводом информации об изменении температуры среды на входе (см. рис. 11.11, *а*). При значительном изменении расхода нагреваемой среды используется каскадная система регулирования соотношения расхода топлива и нагреваемой среды с коррекцией по температуре среды на выходе из печи (см. рис. 11.11, *б*).

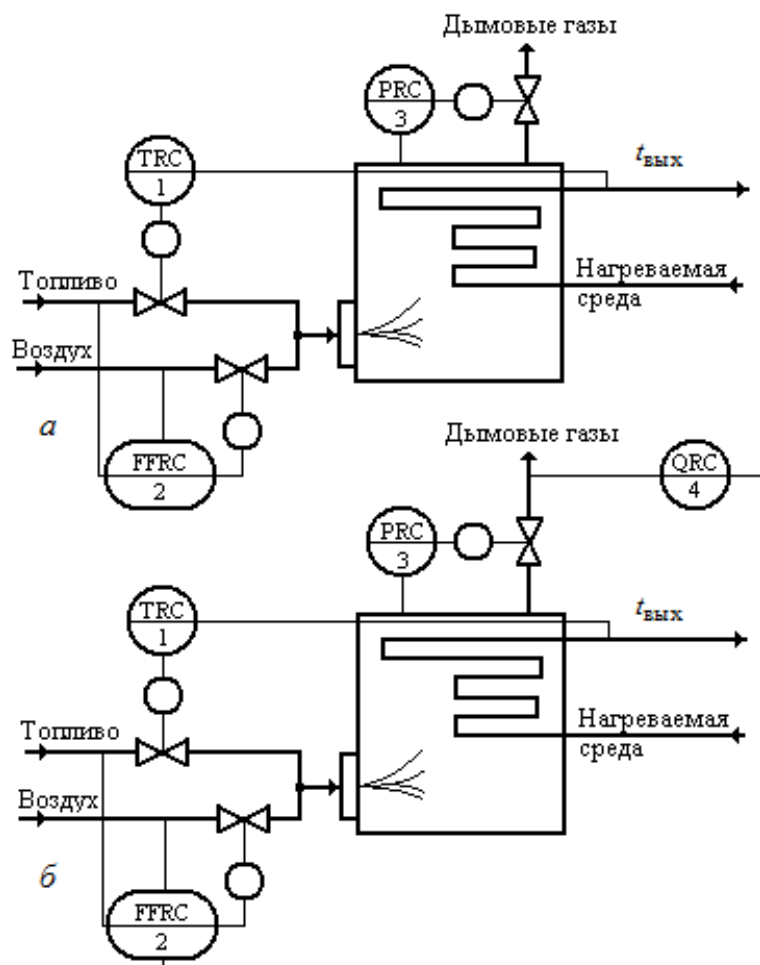


Рис. 11.10. Схемы регулирования печей

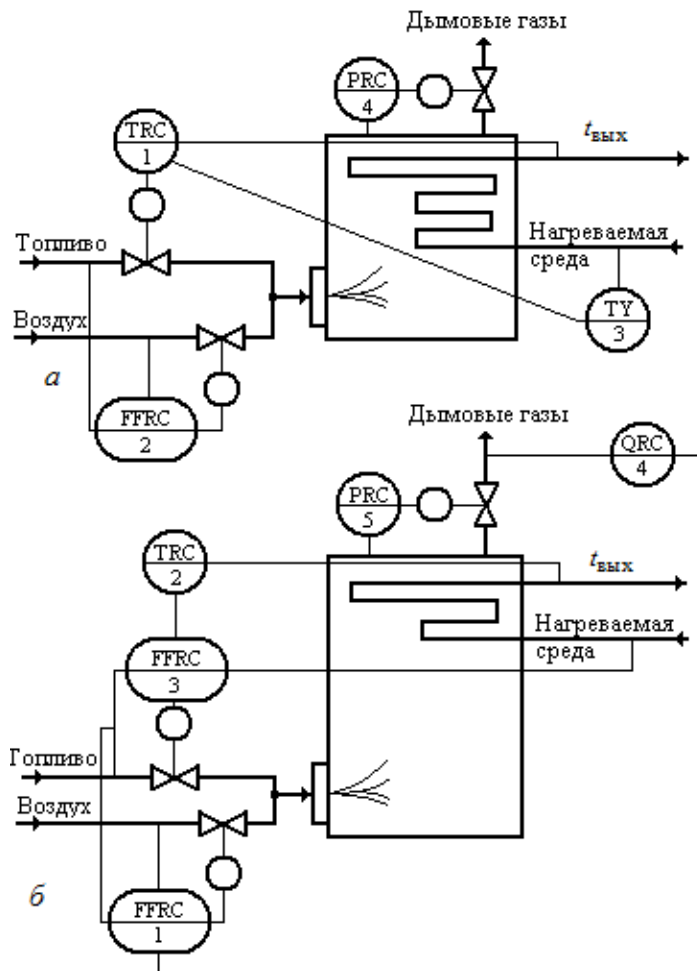


Рис. 11.11. Схемы регулирования печей

### 11.3. Регулирование массообменных процессов

При управлении массообменными процессами в большинстве случаев предусматривается стабилизация параметров для поддержания материального и теплового балансов, что позволяет обеспечить процесс массопереноса в соответствии с требованиями технологического регламента.

**Автоматизация процесса выпаривания** преследует решение главной задачи – получение раствора заданной концентрации  $C_{ур}$ .

Обычно процессы выпаривания осуществляются в многокорпусных выпарных установках. Исходный раствор поступает в первый по ходу раствора выпарной аппарат ВА-1 и нагревается до температуры кипения греющим паром. Часть растворителя испаряется и в виде вторичного пара поступает на обогрев раствора во втором выпарном аппарате ВА-2 (см. рис. 11.12). Затем раствор попадает в последний выпарной аппарат ВА-3, где его концентрация доводится до заданного значения. Упаренный раствор отводится из аппарата, а вторичный пар поступает

в атмосферный конденсатор АК.

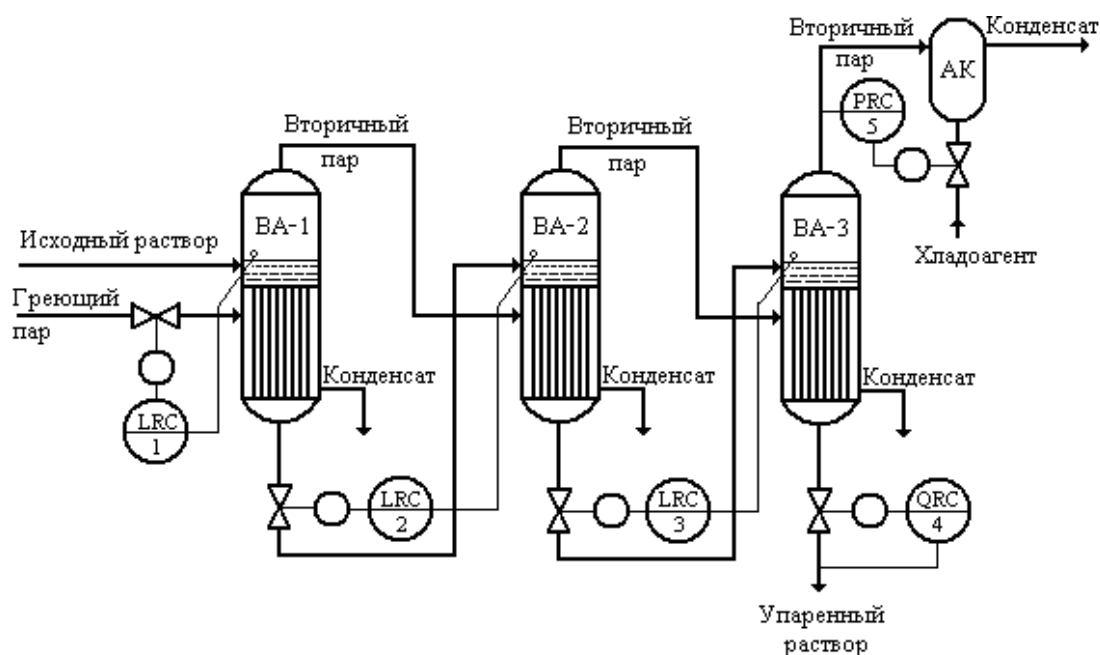


Рис. 11.12. Схема автоматизации трехкорпусной выпарной установки

В каждом аппарате стабилизируется уровень жидкости для сохранения материального баланса. В последнем по ходу раствора аппарате стабилизируется давление за счет изменения расхода хладоносителя и концентрация упаренного раствора за счет изменения времени пребывания раствора в аппарате.

С целью компенсации влияния изменения расхода исходного раствора используется каскадная схема регулирования соотношения расхода исходного раствора и греющего пара с коррекцией по концентрации упаренного раствора. Выбор системы управления зависит от вида возмущений и требований к качеству упаренного раствора.

В результате осуществления **процесса кристаллизации** в маточном растворе должны находиться кристаллы, выросшие до заданного размера. Автоматических приборов для измерения размера кристаллов в потоке пока нет, поэтому поставленную задачу можно решить, обеспечив стабилизацию технологических параметров.

Система 1 (см. рис. 11.13) обеспечивает стабилизацию температуры раствора в **кристаллизаторе**. Система 2 обеспечивает постоянный расход исходного раствора в соответствии с заданной производительностью кристаллизатора. Система 3 обеспечивает сохранение материального баланса в кристаллизаторе за счет изменения расхода маточного раствора.

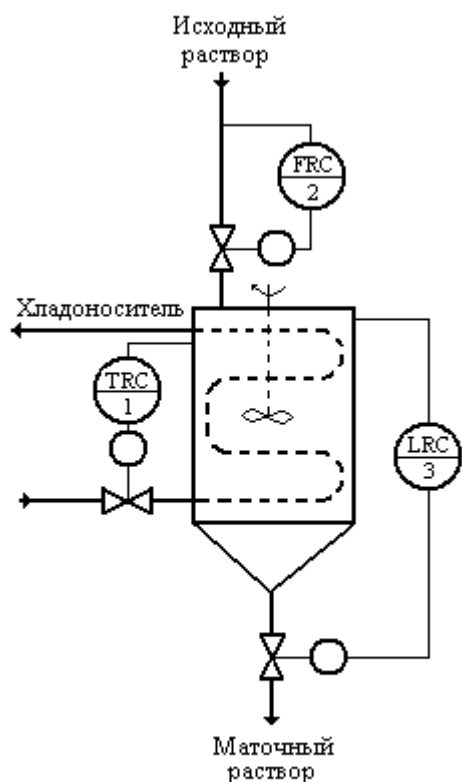


Рис. 11.13. Схема автоматизации кристаллизатора

**Система управления процессом абсорбции** должна обеспечить заданное значение концентрации извлекаемого компонента в продукте. Если процесс осуществляется в насадочных абсорбционных колоннах, то продуктом является обедненная газовая смесь (рис. 11.14). Исходная смесь охлаждается в холодильнике 1 до заданной температуры, которая стабилизируется регулятором системы 1 путем изменения расхода хладоносителя. С целью обеспечения определенного гидродинамического режима абсорбционной колонны система 2 поддерживает постоянный расход газовой смеси в нижнюю часть колонны 2, где система 3 поддерживает постоянный уровень насыщенного абсорбента. Система 4 поддерживает постоянное давление в верхней части колонны за счет изменения гидравлического сопротивления

газопровода, по которому отводится обедненная газовая смесь.

Свежий абсорбент охлаждается в холодильнике 3 до определенной температуры, которая стабилизируется регулятором системы 6 путем изменения расхода хладоносителя.

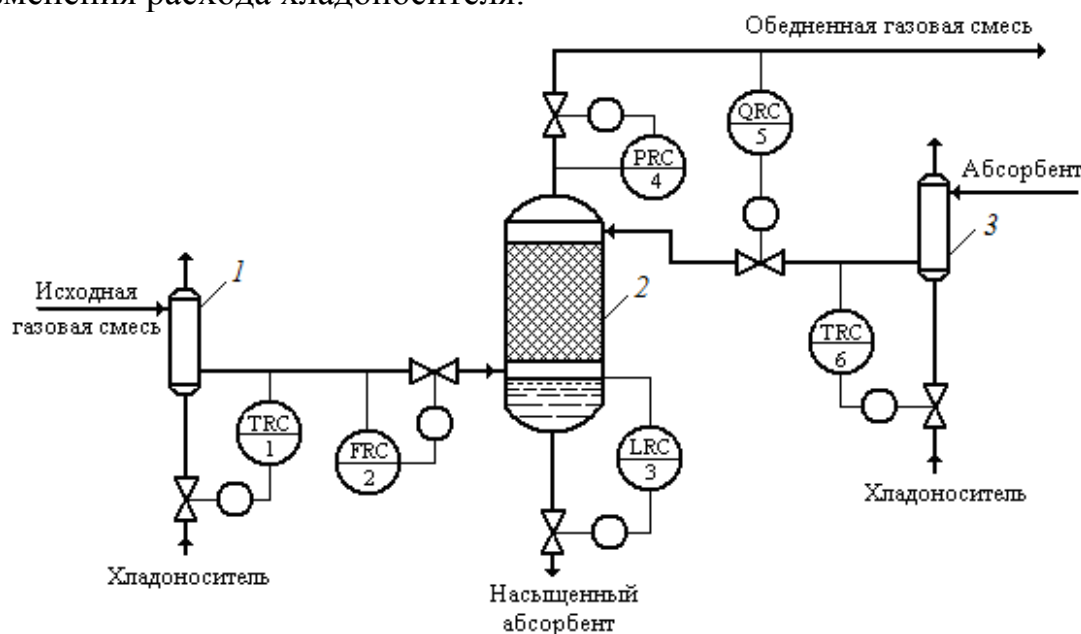


Рис. 11.14. Схема автоматизации процесса абсорбции

При взаимодействии газовой смеси с абсорбентом в объеме насад-

ки абсорбент поглощает извлекаемый компонент, концентрация которого стабилизируется системой 6 путем изменения расхода свежего абсорбента в верхнюю часть колонны. Широкое применение получили многоконтурные системы регулирования процесса абсорбции (рис. 11.15), позволяющие повысить качество продукта за счет введения корректирующих воздействий при изменении расхода и состава исходной газовой смеси, состава обедненной газовой смеси. Система регулирования соотношения расходов исходной смеси и абсорбента 4 получает корректирующее воздействие для изменения коэффициента соотношения по концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой смеси 2 и обедненной газовой смеси. Для регулирования уровня абсорбента в колонне используется каскадная схема регулирования расхода насыщенного абсорбента 7 с коррекцией по уровню 8.

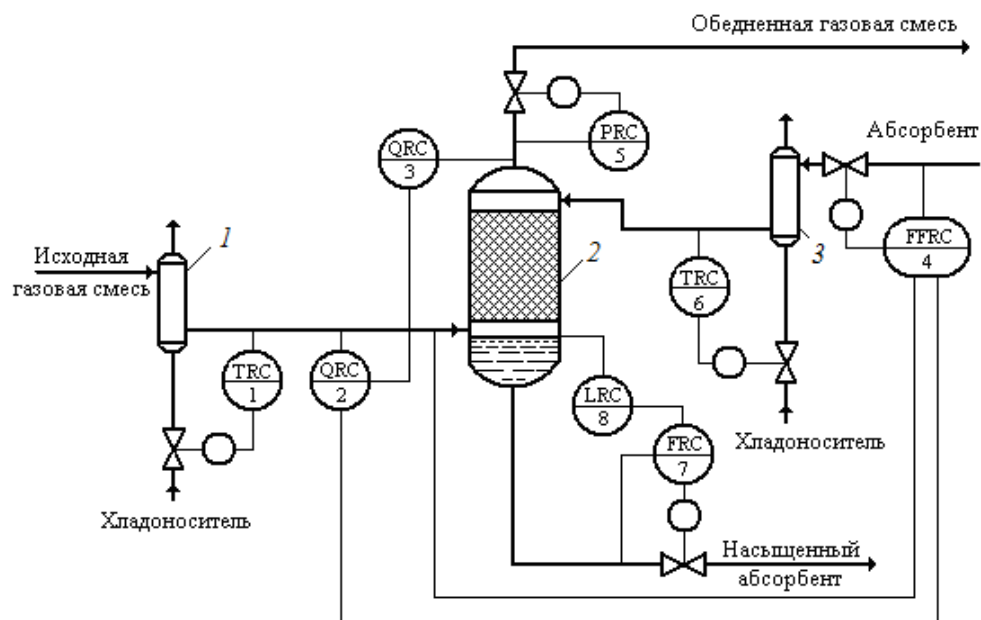


Рис. 11.15. Схема автоматизации процесса абсорбции с помощью многоконтурных систем

Если продуктом процесса, осуществляемого в **тарельчатых абсорбционных колоннах**, например в производстве кислот, является кубовый продукт, то система управления должна обеспечивать заданный его состав (см. рис. 11.16). При переменном расходе исходной газовой смеси целесообразно использовать каскадную схему регулирования соотношения расходов 3 абсорбента и исходной газовой смеси с коррекцией по составу 4 кубового продукта. Системы 1 и 2 обеспечивают стабилизацию давления в верхней части колонны и уровня кубового продукта соответственно.

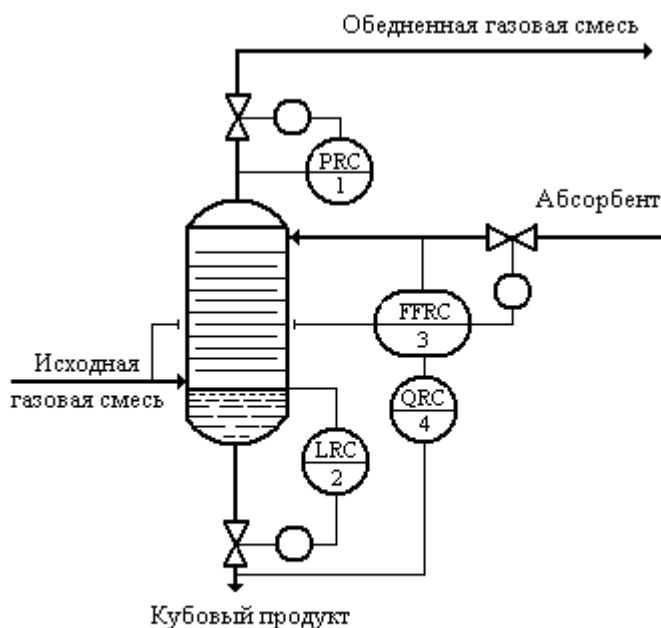


Рис. 11.16. Схема автоматического регулирования тарельчатой абсорбционной колонны

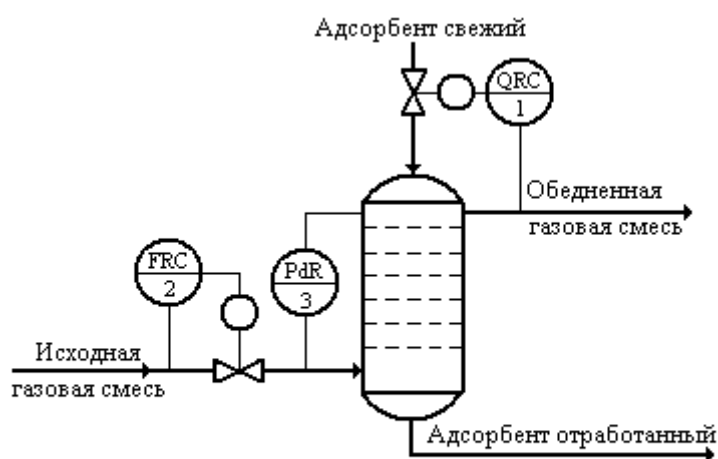


Рис. 11.17. Схема автоматического регулирования тарельчатой адсорбционной колонны

**Процессы адсорбции** часто осуществляются в тарельчатых аппаратах с кипящим слоем (рис. 11.17). С помощью дозатора свежий адсорбент подается на верхнюю тарелку. Под действием силы тяжести адсорбент проваливается с тарелки на тарелку и выводится из нижней части аппарата. Газовая смесь движется в противотоке с адсорбентом. Система управления должна обеспечить заданный состав обедненной газовой смеси. Для этого система 1 стабилизирует содержание извлекаемого компонента в обедненной газовой смеси за счет изменения подачи свежего адсорбента на верхнюю тарелку. Система 2 обеспечивает постоянный расход исходной газовой смеси в соответствии с производительностью

установки и поддержание заданного гидродинамического режима, который контролируется по перепаду давления 3 в адсорбере.

**Система управления процессом жидкостной экстракции** должна обеспечить заданное значение концентрации экстрагируемого вещества в рафинате. Процесс экстракции осуществляется в насадочных колоннах (см. рис. 11.18). Исходный раствор подается в верхнюю часть колонны и движется по насадке вниз, отдавая экстрагируемое вещество движущемуся вверх экстрагенту. В результате на выходе получают экстракт (раствор извлеченных веществ в экстрагенте) и рафинат (раствор с остаточной концентрацией экстрагируемого вещества). При переменном расходе и составе исходного раствора используется каскадная сис-

тема регулирования соотношения расходов *1* исходного раствора и экстрагента с коррекцией по содержанию экстрагируемых веществ в исходном растворе *2* и рафинате *3*. Изменяя отвод рафината из колонны, регулируют уровень поверхности раздела фаз *4*.

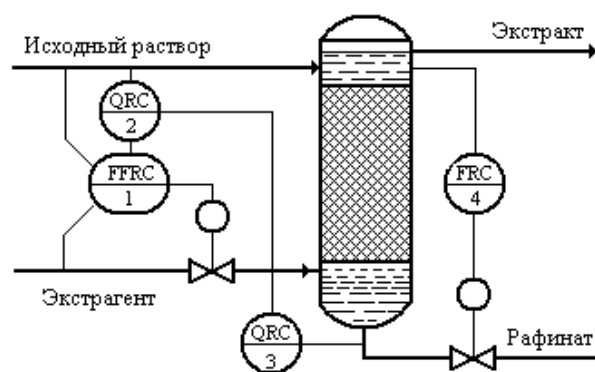


Рис. 11.18. Схема автоматизации процесса экстракции

Система управления процессом **бинарной ректификации** должна обеспечить заданный состав дистиллята и поддержание теплового и материального балансов колонны (см. рис. 11.19). Наиболее просто поставленная задача решается за счет стабилизации технологических параметров. Система *1* обеспечивает поддержание бинарной смеси, подаваемой на тарелку питания колонны *1*, при температуре кипения за счет изменения подачи теплоносителя в теплообменник *2*. Система *2* стабилизирует подачу греющего пара в кипятильник *3*, если продуктом процесса является дистиллят. Система *3* стабилизирует давление в верхней части колонны за счет изменения скорости конденсации пара в конденсаторе *4*. Система *4* поддерживает постоянный уровень в кубе колонны за счет изменения расхода кубового продукта. Система *5* поддерживает постоянный уровень дистиллята во флегмовой емкости *5*. Состав дистиллята однозначно определяется температурой на верхней тарелке, которая стабилизируется системой *6* за счет изменения подачи флегмы.

Если продуктом ректификации является кубовый продукт, то целесообразно стабилизировать расход дистиллята в соответствии с заданной производительностью и температуру потока на выходе из кипятильника *3*.

Широкое применение для управления процессом бинарной ректификации нашли различного типа неодаконтурные системы, в зависимости от условий работы колонны, в том числе с использованием вычислительных устройств.

**В насадочных ректификационных колоннах** система управления должна обеспечивать поддержание заданного гидродинамического режима, оцениваемого по перепаду давления на насадке (см. рис. 11.20). Система *1* стабилизирует перепад давления на насадке за счет изменения греющего пара в кипятильник. Система *5* поддерживает постоянную концентрацию низкикипящего компонента в дистилляте за счет изменения отбора дистиллята.





должна обеспечить поддержание заданного значения влагосодержания материала на выходе из сушилки. Влажный материал из бункера 1 с помощью шнекового 2 или ленточного 3 дозатора подается во вращающийся сушильный барабан 6 и перемещается под действием силы тяжести в бункер сухого материала 6 (рис. 11.21). Система 1 обеспечивает постоянный расход влажного материала за счет изменения режима работы дозатора. Сушильный агент в виде смеси дыма и вторичного воздуха взаимодействует с материалом и забирает влагу.

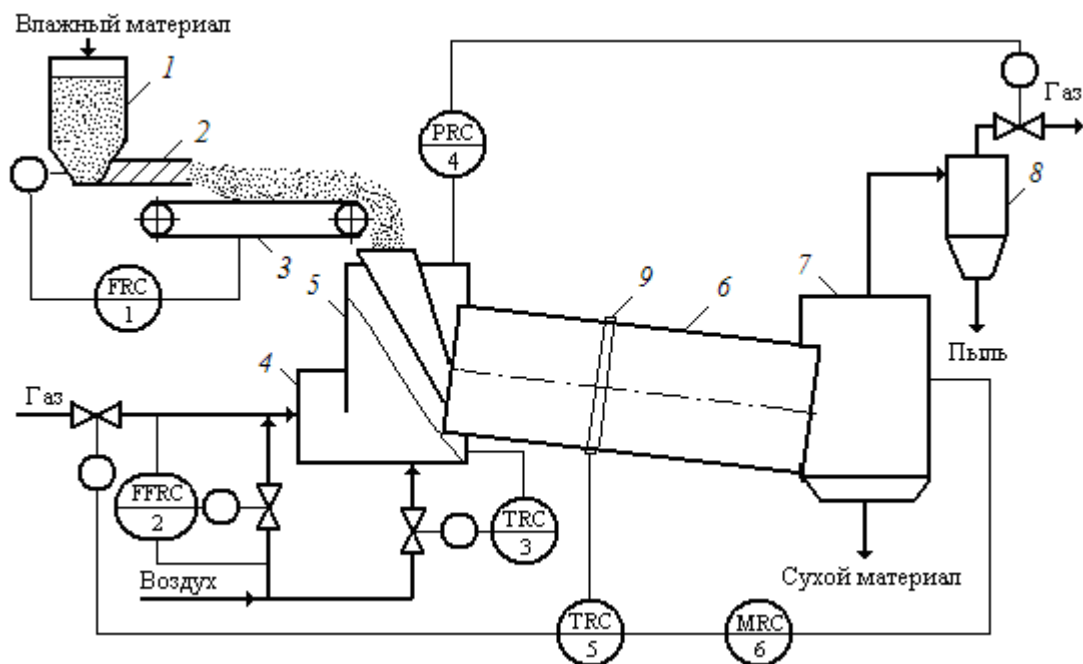


Рис. 11.21. Схема автоматизации процесса сушки материала в барабанной сушилке

После очистки от пыли в циклоне 8 сушильный агент выбрасывается в атмосферу. Для экономичного сжигания топлива используется система 2 регулирования соотношения расходов топлива и первичного воздуха, поступающих в топку 4. Заданное значение температуры сушильного агента на входе в барабан обеспечивается системой 3 путем изменения подачи вторичного воздуха в камеру смешения 5. Постоянную скорость движения сушильного агента по барабану обеспечивает система 4 регулирования разрежения в камере смешения за счет изменения расхода сушильного агента в атмосферу. Остаточная влажность сухого материала оценивается по косвенному параметру – влажности сушильного агента на выходе из барабана. Однако качественное регулирование не может быть достигнуто из-за большого запаздывания в объекте при значительной длине барабана. Тогда используется каскадная схема регулирования температуры сушильного агента 5 на некотором удалении от входа в барабан с коррекцией по влажности сушильно-

го агента 6 на выходе из барабана. Температура сушильного агента в барабане измеряется термопарами, подключенными к токосъемному устройству 9.

Процесс сушки материала в **сушилках с кипящим слоем** менее инерционный по сравнению с сушкой в барабанных сушилках. Материал в кипящем слое хорошо перемешивается и равномерно нагревается и сушится потоком сушильного агента, поэтому для достижения заданного значения остаточной влажности материала достаточно поддерживать заданное значение температуры в слое за счет изменения подачи сырого материала из бункера 1 в сушилку 3, изменяя режим работы дозатора 2 (система 3). При этом необходимо обеспечить постоянную температуру и расход сушильного агента в сушилку (системы 2 и 4). При постоянном давлении над слоем, обеспечиваемом системой 5, перепад давления однозначно определяет высоту слоя, поэтому материальный баланс в сушилке поддерживается за счет изменения отвода сухого материала (система 6).

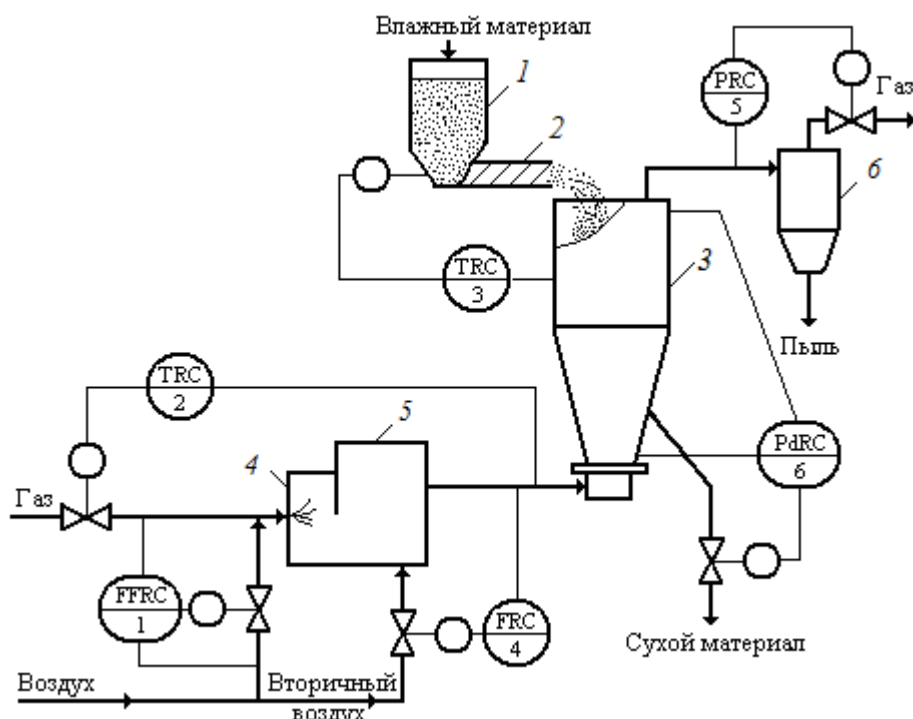


Рис. 11.22. Схема автоматизации процесса сушки материала в сушилке с кипящим слоем

#### 11.4. Регулирование химических процессов

Химическое превращение исходных веществ в продукты осуществляется в химических реакторах и сопровождается гидродинамическими, тепловыми и массообменными процессами, поэтому системы управления химическими реакторами в большинстве случаев решают задачи стабилизации технологических параметров относительно их за-

данных значений, что обеспечивает получение продукта заданного качества. В промышленности используются разнообразные конструкции реакторов, как правило, работающих в сложных технологических цепочках. Системы управления такими процессами разрабатываются индивидуально с учетом всех особенностей их реализации. В связи с этим ниже будет рассмотрено несколько примеров построения схем автоматизации химических реакторов.

Если в реакторе с мешалкой протекает эндотермическая реакция, то для поддержания теплового баланса в паровую рубашку подводится греющий пар (рис. 11.23, а). Тогда температуру реакционной массы можно стабилизировать за счет изменения расхода греющего пара в рубашку.

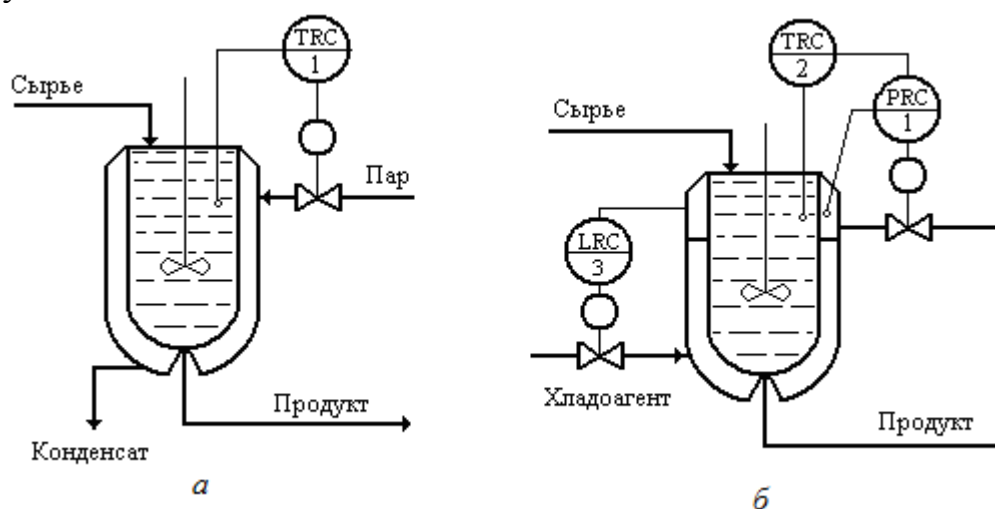
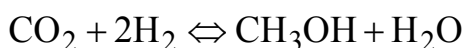


Рис. 11.23. Схемы регулирования реакторов с мешалкой

Если в реакторе с мешалкой протекает экзотермическая реакция, то для отвода тепла в рубашку подается, например, кипящий хладагент (рис. 11.23, б). Тогда заданное значение температуры реакционной массы можно поддерживать с помощью каскадной системы регулирования давления паров хладагента в рубашке 1 с коррекцией по температуре реакционной массы 2. При этом система 3 стабилизирует постоянный уровень хладагента в рубашке.

**Процесс синтеза метанола** осуществляется в полочном реакторе на медьсодержащем катализаторе фирмы ICI. Сырьем является синтез-газ, который подается в смеситель 6, где смешивается с неконденсировавшимся в сепараторе 5 газом. Смесь при температуре 59 °С поступает в компрессор 7, затем в теплообменники 3 и 2 для нагрева до температуры 237 °С. При этой температуре синтез-газ поступает на первую полку с катализатором, в присутствии которого осуществляется реакция синтеза метанола:



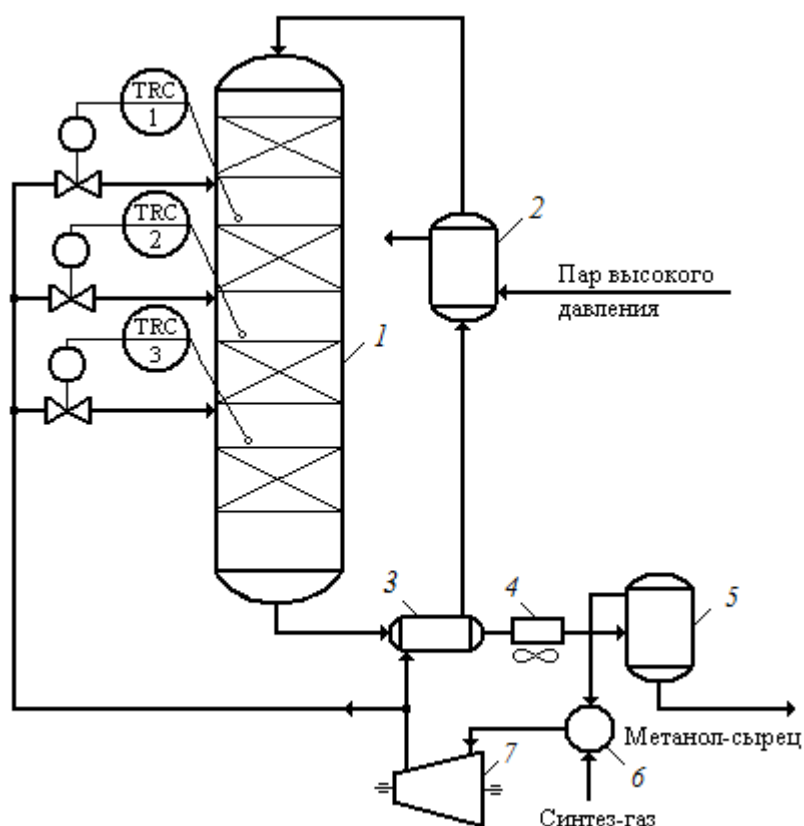


Рис. 11.24. Схема регулирования реактора синтеза метанола

При этом выделяется тепло, в результате чего смесь нагревается до температуры 256 °С. Для снижения температуры смеси до 225 °С в межполочное пространство вводится холодный синтез-газ в количестве, определяемом системой 1 регулирования температуры. По аналогичным причинам на второй полке смесь нагревается до температуры 274 °С и затем охлаждается до температуры 242 °С; на третьей полке смесь нагревается до температуры 269 °С и затем охлаждается до температуры 239 °С; на четвертой полке смесь нагревается до температуры 271 °С и поступает в теплообменник 3, отдавая тепло синтез-газу. В воздушном холодильнике смесь дополнительно охлаждается и поступает в сепаратор, где отделяется метанол-сырец, представляющий собой смесь метилового спирта с водой. Для достижения заданной степени превращения смесь циркулирует в замкнутом контуре в соответствии с заданной кратностью циркуляции.

**Процесс каталитического риформинга**, осуществляющийся с целью повышения детонационной стойкости бензинов, включает три основных типа реакций, которым подвергаются углеводороды: ароматизация, изомеризация и гидрокрекинг. Реакции протекают на кислотных и металлических центрах катализатора, находящегося в трех адия-

батических реакторах (рис. 11.25) при максимальной температуре 530 °С.

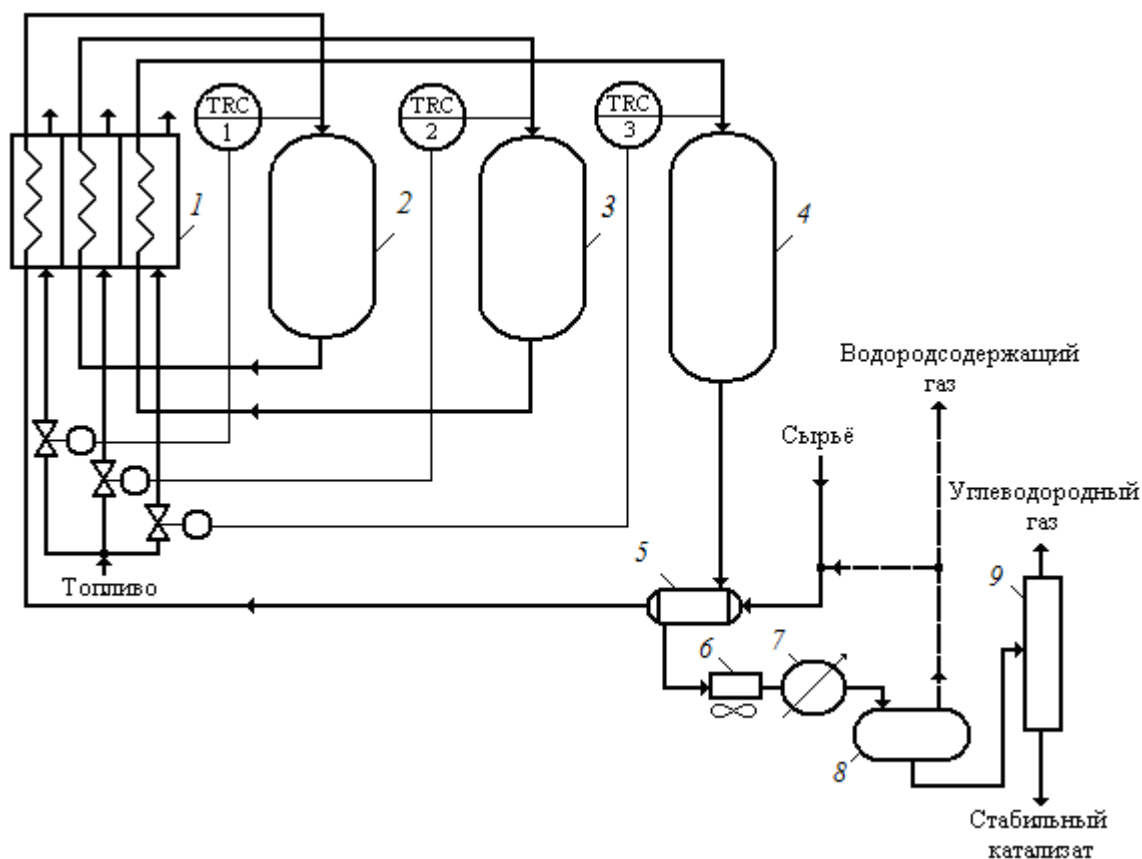


Рис. 11.25. Схема автоматизации установки каталитического риформинга бензинов

На вход установки подается сырьё (прямогонные бензиновые фракции), поступающее после смешения с водородсодержащим газом и предварительного нагрева в теплообменнике 5 в трехкамерную печь 1 для нагрева до заданной температуры, которая стабилизируется системой 1 путем изменения расхода топлива в печь. В реакторе 2 смесь охлаждается за счет протекания эндотермических реакций и снова направляется в печь для подогрева до заданного значения температуры, которая стабилизируется системой регулирования 2. В реакторе 3 смесь охлаждается по той же причине, что и в предыдущем случае, и направляется в печь для подогрева до заданного значения температуры, которая стабилизируется системой регулирования 3. Выходящая из реактора 4 газопродуктовая смесь охлаждается в теплообменнике 5, в воздушном 6 и водяном 7 холодильниках и поступает в сепаратор 8, где сепарируется водородсодержащий газ, основная часть которого возвращается в технологическую систему процесса риформинга, а избыток его передается другим потребителям. Катализат подается в стабилизационные колонны 9, где продукты реакции разделяются на катализат с заданным

давлением паров, сжиженный газ и сухой углеводородный газ. Из стабильного катализата затем получают товарный бензин с заданной детонационной стойкостью (с заданным октановым числом).

# Приложение

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ В СХЕМАХ ПО ГОСТ 21.404–85



ГОСТ 21.404–85 устанавливает условные обозначения приборов, средств автоматизации и линий связи, применяемых при выполнении схем автоматизации технологических процессов.

1. Условные обозначения.
  - 1.1. Графические обозначения.
    - 1.1.1. Графические обозначения приборов, средств автоматизации и линий связи должны соответствовать приведенным в табл. П1.1.

Таблица П1.1

Наименование	Обозначение
1. Прибор, устанавливаемый вне щита (по месту): а) основное изображение б) допускаемое обозначение	
2. Прибор, устанавливаемый на щите, на пульте: а) основное изображение б) допускаемое изображение	
3. Исполнительный механизм. Общее обозначение	
4. Исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала: а) открывает регулирующий орган б) закрывает регулирующий орган в) оставляет регулирующий орган в неизменном положении	
5. Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом	



Наименование	Обозначение
6. Линия связи. Общее обозначение	_____
7. Пересечение линий связи без соединения друг с другом	
8. Пересечение линий связи с соединением между собой	

1.1.2. Отборное устройство для постоянно подключенных приборов изображают сплошной тонкой линией, соединяющей технологический трубопровод или аппарат с прибором (рис. П.1). При необходимости указания конкретного места расположения отборного устройства (внутри контура технологического аппарата) его обозначают кружком диаметром 2 мм (рис. П.2).

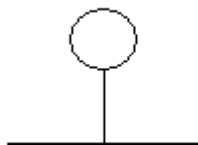


Рис. П.1

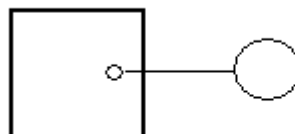


Рис. П.2

## 1.2. Буквенные обозначения.

1.2.1. Основные буквенные обозначения измеряемых величин и функциональных признаков приборов должны соответствовать приведенным в табл. П1.2.

1.2.2. Дополнительные буквенные обозначения, применяемые для указания дополнительных функциональных признаков приборов, преобразователей сигналов и вычислительных устройств, приведены в табл. П1.3.

## 1.3. Размеры условных обозначений.

1.3.1. Размеры условных графических обозначений приборов и средств автоматизации в схемах приведены в табл. П1.4.

1.3.2. Условные графические обозначения на схемах выполняют сплошной толстой основной линией, а горизонтальную разделительную черту внутри графического обозначения и линии связи – сплошной тонкой линией по ГОСТ 2.303–68.

Таблица П1.2

Обозначение	Измеряемая величина		Функциональный признак прибора		
	Основное обозначение измеряемой величины	Дополнительное обозначение, уточняющее измеряемую величину	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
<i>A</i>	+	–	Сигнализация	–	–
<i>B</i>	+	–	–	–	–
<i>C</i>	+	–	–	Автоматическое регулирование. Управление	–
<i>D</i>	Плотность	Разность, перепад	–	–	–
<i>E</i>	Электрическая величина (п.2.13)	–	+	–	–
<i>F</i>	Расход	Соотношение, доля, дробь	–	–	–
<i>G</i>	Размер, положение, перемещение	–	+	–	–
<i>H</i>	Ручное воздействие	–	–	–	Верхний предел измеряемой величины
<i>I</i>	+	–	Показание	–	–
<i>J</i>	+	Автоматическое переключение, обегание	–	–	–
<i>K</i>	Время, временная программа	–	–	+	–
<i>L</i>	Уровень	–	–	–	Нижний предел измеряемой величины
<i>M</i>	Влажность	–	–	–	–
<i>N</i>	+	–	–	–	–
<i>O</i>	+	–	–	–	–
<i>P</i>	Давление, вакуум	–	–	–	–
<i>Q</i>	Величина, характеризующая качество: состав, концентрация и т. д.	Интегрирование, суммирование по времени	–	+	–
<i>R</i>	Радиоактивность	–	Регистрация	–	–
<i>S</i>	Скорость, частота	–	–	Включение, отключение, переключение, блокировка	–

Окончание табл. П1.2

Обозначение	Измеряемая величина		Функциональный признак прибора		
	Основное обозначение измеряемой величины	Дополнительное обозначение, уточняющее измеряемую величину	Отображение информации	Формирование выходящего сигнала	Дополнительное значение
$T$	Температура	–	+	+	–
$U$	Несколько разнородных измеряемых величин	–	–	–	–
$V$	Вязкость	–	+	–	–
$W$	Масса	–	–	–	–
$X$	Нерекомендуемая резервная буква	–	–	–	–
$Y$	+	Соотношение, доля, дробь	–	+	–
$Z$	+	–	–	+	–

Примечание. Буквенные обозначения, отмеченные знаком "+", являются резервными, а отмеченные знаком "-" - не используются.

1.3.3. Шрифт буквенных обозначений по ГОСТ 2.304–81 принимают равным 2,5 мм.

Таблица П1.3

Наименование	Обозначение	Назначение
Чувствительный элемент	$E$	Устройства, выполняющие первичное преобразование: преобразователи термоэлектрические, термопреобразователи сопротивления, датчики пирометров, сужающие устройства расходомеров и т. п.
Дистанционная передача	$T$	Приборы бесшкальные с дистанционной передачей сигнала: манометры, дифманометры, манометрические термометры
Станция управления	$K$	Приборы, имеющие переключатель для выбора вида управления и устройство для дистанционного управления
Преобразование, вычислительные функции	$Y$	Для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств

## 2. Правила построения условных обозначений.


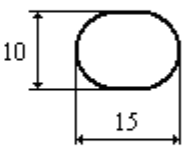
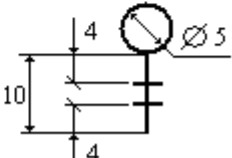
2.1. Настоящий стандарт устанавливает два метода построения условных обозначений:

- упрощенный;
- развернутый.

2.2. При упрощенном методе 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.

Таблица П1.4

Наименование	Обозначение
Прибор: а) основное обозначение	
б) допускаемое обозначение	
Исполнительный механизм	

2.3. При развернутом методе построения каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект средств автоматизации, указывают отдельным условным обозначением.

2.4. Условные обозначения приборов и средств автоматизации, применяемые в схемах, включают графические, буквенные и цифровые обозначения.

2.5. Порядок расположения букв в буквенном обозначении принимают следующим:

- основное обозначение измеряемой величины;
- дополнительное обозначение измеряемой величины (при необходимости);
- обозначение функционального признака прибора.

2.6. При построении обозначений комплектов средств автоматизации первая буква в обозначении каждого входящего в комплект прибора или устройства (кроме устройств ручного управления) является наименованием измеряемой комплектной величины.

2.7. 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*.

Таблица П2.1

Наименование	Обозначение
1. Род энергии сигнала: электрический пневматический гидравлический	$E$ $P$ $G$
2. Виды форм сигнала: аналоговый дискретный	$A$ $D$
3. Операции, выполняемые вычислительным устройством: суммирование умножение сигнала на постоянный коэффициент $k$ перемножение двух и более сигналов друг на друга деление сигналов друг на друга возведение сигнала $f$ в степень $n$  извлечение из величины сигнала корня степени $n$ логарифмирование дифференцирование интегрирование  изменение знака сигнала ограничение верхнего значения сигнала ограничение нижнего значения сигнала	$\Sigma$ $k$ $\times$ $:$ $f_n$ $n\sqrt{\phantom{x}}$ $\lg$ $dx/dt$ $\int$ $x(-1)$ $\max$ $\min$
4. Связь с вычислительным комплексом: передача сигнала на ЭВМ вывод информации с ЭВМ	$B_i$ $B_0$

2.8. Порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков прибора принимают с соблюдением последовательности обозначений:  $I$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $A$ .

2.9. При построении буквенных обозначений указывают не все функциональные признаки прибора, а лишь те, которые используют в данной схеме.

2.10. 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.

2.11. 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 две буквы:  $S$  и  $A$ .

2.12. 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.

2.13. При необходимости конкретизации измеряемой величины

справа от графического обозначения прибора допускается указывать наименование или символ этой величины.

2.14. Для обозначения величин, не предусмотренных данным стандартом, допускается использовать резервные буквы. Применение резервных букв должно быть расшифровано на схеме.

2.15. Подвод линий связи к прибору изображают в любой точке графического обозначения (сверху, снизу, сбоку). При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях связи наносят стрелки.

2.16. Принцип построения условного обозначения прибора приведен на рис. ПЗ.



Рис. П. 3. Принцип условного обозначения прибора

2.17. Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации приведены в табл. П2.2.



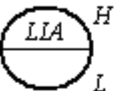






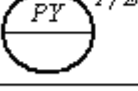


Таблица П2.2

№ п/п	Обозначение	Наименование
1		Первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленный по месту. Например: преобразователь термоэлектрический, термопреобразователь сопротивления, термобаллон манометрического термометра, датчик пирометра и т. д.
2		Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту. Например: термометр ртутный, термометрманометрический и т. д.

Продолжение табл. П2.2

№ п/п	Обозначение	Наименование
3		Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите. Например: милливольтметр, потенциометр, мост автоматический и т. д.
4		Прибор для измерения температуры беспкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. Например: термометр манометрический (или любой другой датчик температуры) беспкальный с пневматической или электрической системой передачи показаний
5		Прибор для измерения температуры одоточечный, регистрирующий, установленный на щите. Например: самопишущий милливольтметр, потенциометр, мост автоматический и т.п.
6		Прибор для измерения температуры с автоматическим обегаяющим устройством, регистрирующий, установленный на щите. Например: многоточечный самопишущий потенциометр и т. д.
7		Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите. Например: потенциометр регистрирующий со встроенным регулирующим устройством и т. д.
8		Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите. Например: вторичный прибор и регулирующий блок системы "Старт"
9		Байпасная панель дистанционного управления, установленная на щите
10		Переключатель электрических цепей измерения (управления), переключатель для газовых (воздушных) линий, установленный на щите
11		Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, установленный по месту. Например: показывающий манометр, дифманометр, тягомер, напорометр, вакуумметр и т. д.
12		Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту. Например: дифманометр показывающий
13		Прибор для измерения давления (разрежения) беспкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. Например: манометр беспкальный с пневматической или электрической системой передачи показаний
14		Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий с контактным устройством, установленный по месту. Например: электроконтактный манометр и т. д.

Окончание табл. П2.2

№ п/п	Обозначение	Наименование
15		Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите. Например: любой вторичный прибор для регистрации соотношения расходов
16		Прибор для измерения уровня с контактным устройством, установленный по месту. Например: реле уровня, используемое для блокировки и сигнализации верхнего уровня
17		Прибор для измерения уровня показывающий с контактным устройством, установленный на щите. Например: вторичный прибор с сигнальным устройством. Буквы <i>H</i> и <i>L</i> означают сигнализацию верхнего и нижнего уровня
18	   	Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту.  Например:  Напряжение *  Сила тока *  Мощность *
19		Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите. Например: командный электропневматический прибор, многоцепное реле
20		Первичный измерительный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту. Например: датчик <i>pH</i> -метра
21		Преобразователь сигнала, установленный по месту. Входной сигнал пневматический, выходной сигнал электрический
22		Пусковая аппаратура для управления электродвигателем (для включения, выключения насоса; открытия, закрытия задвижки и т. д.), установленная по месту. Например: магнитный пускатель, контактор и т. п. Применение резервной буквы <i>N</i> должно быть оговорено на поле схемы.
23		Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления (включение, выключение двигателя, открытие, закрытие запорного органа; изменение задания регулятору), установленная на щите. Например: кнопка, ключ управления, задатчик

\* Надписи, расшифровывающие конкретную измеряемую электрическую величину, располагаются либо рядом с прибором либо в виде таблицы на поле чертежа.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление в химической промышленности: учеб. для вузов / под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
2. Анисимов В.И. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1967. – 408 с.
3. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 690 с.
4. ГОСТ 21.404–85. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 18 с.
5. Ефремова Т.К., Тагаевская А.А., Шубин А.Н. Пневматические комплексы технических средств автоматизации. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
6. Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х., Ключев А.А. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
7. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
8. Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. – М.: Химия, 1988. – 288 с.
9. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических процессов. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1982. – 256 с.
10. Промышленные приборы и средства автоматизации. Справочник / под ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
11. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами / под ред. И.М. Масленникова. – М.: Химия, 1986. – 336 с.
12. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 400 с.
13. Стефании Е.П. Основы построения АСУ ТП. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
14. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. – М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.
15. Федоров А.Ф., Баженов Д.А. Системы управления химико-технологическими процессами: лабораторный практикум. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 88 с.
16. Федоров А.Ф., Баженов Д.А. Системы управления химико-технологическими процессами. Ч. II: лабораторный практикум. –

Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 63 с.

17. Шарков А.А., Притыко Г.М., Палюх Б.В. Автоматическое регулирование и регуляторы в химической промышленности. – М.: Химия, 1990. – 288 с.

18. Шувалов В.В., Огаджанов Г.А., Голубятников В.А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. – М.: Химия, 1991. – 480 с.

19. Ogunnaike B., Ray W.H. Process Dynamics, Modeling and Control. – New York, Oxford: Oxford University Press, 1994. – 1260 p.