

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением по университетскому
политехническому образованию в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлениям
подготовки бакалавров и магистров
«Технологические машины и оборудование»*



Санкт-Петербург
2015

УДК 621.56+664

ББК 31.392:36

Т 38

Техника измерений холодильных установок и пищевых производств: Учеб. пособие / В.Б. Данин, В.В. Данин, А.А. Малышев, В.О. Мамченко. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 197 с.

ISBN 978-5-7577-0508-8

Изложены вопросы теории автоматического регулирования, приведено описание технических средств автоматизации, освещены вопросы программно-логического управления применительно к системам низкотемпературной техники и пищевых производств.

Рекомендовано для бакалавров и магистрантов направлений 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, изучающих дисциплины «Приборы и техника измерений», «Автоматизация технологических процессов и производств пищевой промышленности» и ряд смежных дисциплин.

Рецензенты: ЗАО «БАРРЕНС» (директор по науке и технике доктор техн. наук В.П. Захаренко); генеральный директор доктор техн. наук, проф. Л.Г. Кузнецов (ОАО «Компрессор»)

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 1 от 22.01.2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Данин В.Б., Данин В.В., Малышев А.А., Мамченко В.О., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материал, изложенный в учебном пособии, соответствует образовательному стандарту НИУ ИТМО 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы кондиционирования» и предназначен для студентов бакалавриата и магистратуры при изучении ими дисциплин «Расчет и конструирование холодильных машин», «Проектирование и эксплуатация холодильных установок», «Машины низкотемпературной техники», «Приборы и техника измерений», «Автоматизация технологических процессов и производств пищевой промышленности». Авторы надеются, что учебное пособие также будет полезно специалистам, проектирующим и эксплуатирующим низкотемпературную технику и системы автоматизации предприятий перерабатывающей промышленности.

Учебное пособие включает в себя вопросы теории автоматического регулирования, описание приборов, технических средств автоматизации, исполнительных механизмов. Специальные разделы посвящены актуальным вопросам программно-логического управления, проектированию автоматизации систем искусственного холода. Все разделы сопровождаются схемами, таблицами и рисунками, иллюстрирующими соответствующий материал.

Авторы выражают искреннюю благодарность аспиранту кафедры холодильных машин и низкопотенциальной энергетики А.В. Богатыреву за активную помощь в подборе материалов для настоящего учебного пособия.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современные холодильные системы базируются на широком использовании методов и средств автоматического управления [1]–[3].

Автоматика – это отрасль науки и техники, охватывающая теорию автоматического управления и принципы построения автоматических систем на базе образующих их технических средств. Теория автоматического управления (ТАУ) ставит своей целью ознакомление с общими принципами построения систем автоматического управления (САУ), процессами и методами исследования процессов в этих системах; САУ реализуются на базе технических средств автоматизации (ТСА). К ТСА относятся все устройства, обеспечивающие формирование, передачу, накопление, хранение, обработку и отображение информации для контроля, управления и регулирования параметров объекта управления.

1.1. Объемы автоматизации

Различают три типа автоматизации: частичную, комплексную и полную.

При *частичной автоматизации* в автоматическом режиме работают только отдельные узлы или объекты низшего ранга, а координация работы всего производственного комплекса находится в руках человека. Примером может служить регулирование уровня жидкого хладагента в циркуляционном или линейном ресиверах в промышленной холодильной установке.

При *комплексной автоматизации* весь автоматизируемый участок производства представляет собою единую, взаимосвязанную систему, обеспечивающую последовательность отдельных операций, но пуск и остановка системы автоматизации осуществляются оператором. В холодильных установках таким автоматизируемым объектом может служить холодильная камера с регулируемой температурой и влажностью воздуха.

При *полной автоматизации* оператор полностью освобожден от выполнения операций управления технологическим процессом. Функции управления, пуска, остановки, выбора оптимального режима работы выполняются посредством управляющих вычислительных машин и микропроцессорных систем.

1.2. Цель автоматизации холодильных систем

Автоматизация холодильных систем значительно сокращает затраты на их эксплуатацию, повышает культуру производства, а автоматический поиск оптимального режима работы основного и вспомогательного оборудования установок позволяет сократить энергетические расходы на выработку искусственного холода.

Автоматизация позволяет строго соблюдать технологический режим термообработки и хранения продуктов, что приводит к существенному уменьшению естественных потерь продукта от его усушки. Например, при хранении мяса в открытой таре (не вакуумная упаковка) при температуре воздуха холодильной камеры -10°C в течение 0,5 года потери составляют около 3 %, а при температуре -28°C за тот же период времени хранения – менее 1 % [1].

К основным технико-экономическим показателям эффективности автоматизации холодильных установок можно отнести следующие [1]:

- уменьшение энергетических затрат на выработку холода до 13 %;
- уменьшение расхода воды до 5 %, это особенно актуально в современных условиях эксплуатации;
- уменьшение усушки продукта до 20 % относительно нормативной;
- обеспечение безопасности работы основного и вспомогательного холодильного оборудования противоаварийными средствами автоматической защиты;
- снижение физического и психического напряжения обслуживающего персонала, повышение культуры производства.

1.3. Основные системы автоматизации

Совокупность объекта регулирования и автоматических устройств, с помощью которых осуществляется технологический процесс, называется *системой автоматизации*. Различают следующие типы систем автоматизации: автоматического контроля, автоматической защиты, автоматической сигнализации, автоматической блокировки, операторного дистанционного управления, автоматического регулирования и управления.

1.3.1. Система автоматического контроля

Упрощенная структурная схема системы автоматического контроля показана на рис. 1.1. Представленная система применяется для осуществления контроля над ходом технологического процесса. При этом преследуются две цели:

наблюдение за ходом технологического процесса, или контроль качества изделия;

получение показателей, необходимых для учета работы установки.

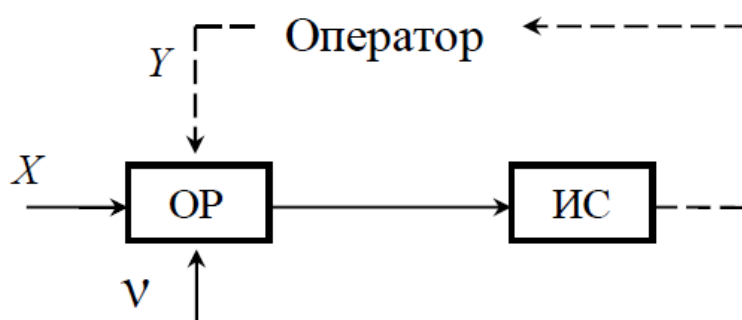


Рис. 1.1. Упрощенная структурная схема системы автоматического контроля:
ОР – объект регулирования; ИС – измерительная система; Y – управляющее воздействие; v – возмущающее воздействие

Например, контроль температуры воздуха камеры хранения и температуры кипения хладагента в испарителе способствует улучшению качества хранения продукта и указывает на состояние поверхностей приборов охлаждения. В качестве измерительных систем обычно используют измерительные комплексы с автоматической записью контролируемого параметра.

1.3.2. Система автоматической защиты

Структурная схема данной системы показана на рис. 1.2. Она применяется для защиты узлов и агрегатов, участвующих в технологическом процессе, от аварийных и предаварийных ситуаций путем отключения аварийного участка, а затем, если в этом есть необходимость, и всего оборудования технологической линии. В холодильных машинах примером защиты могут служить защита от гид-

равлического удара компрессора, защита от повышенных и пониженных температурных режимов работы оборудования и т. д.

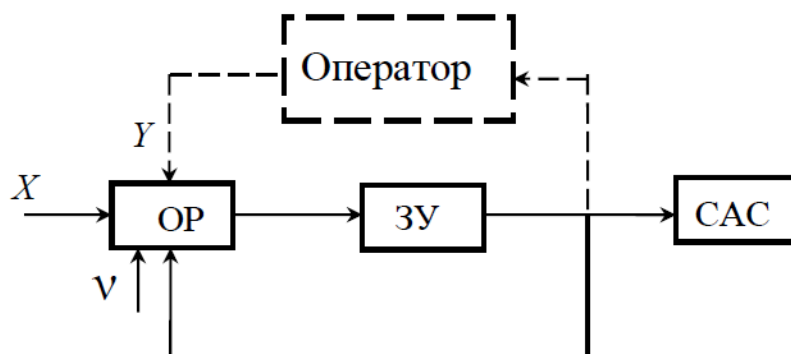


Рис. 1.2. Структурная схема системы:
ЗУ – защитное устройство; САС – система автоматической сигнализации

Технические средства, реализующие защиту: первичные преобразователи (датчики), усилители мощности и релейная контактная или бесконтактная аппаратура, приборы сигнализации.

1.3.3. Система автоматической сигнализации

Данная система служит для привлечения внимания и оповещения обслуживающего персонала об изменениях, происходящих в элементах и узлах производственного комплекса. Принято эту систему подразделять на четыре группы:

командную сигнализацию – обеспечивает передачу типовых командных сигналов от одного поста управления к другому и обратно;

контрольную сигнализацию – служит для автоматического оповещения оператора о включении в работу или остановке отдельных механизмов, о положении рабочих органов на различных коммуникациях;

предупредительную сигнализацию – автоматически оповещает обслуживающий персонал о возникновении опасных изменений режима работы комплекса оборудования, грозящих при дальнейшем их развитии вызвать аварию;

аварийную сигнализацию – служит для автоматического оповещения обслуживающего персонала о произошедшем аварийном отключении оборудования.

Все виды сигнализации выполняются световыми или звуковыми сигналами. Приняты различные цвета линз сигнальных ламп:

- зеленый цвет* – нормальное состояние оборудования;
- желтый* – предупреждающий сигнал;
- красный*, как правило, мигающий – сигнал аварийной остановки;
- молочный, синий и другие цвета* – различные промежуточные и производственные сигналы.

Сигнальные лампы устанавливаются на пультах управления, кнопочных станциях, щитах, мнемосхемах, имитирующих работу включенного оборудования технологического процесса, на световых табло.

Звуковая сигнализация обычно используется как предупредительная или аварийная. Звуковые сигналы должны отличаться от производственных шумов и обеспечивать хорошую слышимость, поэтому в зависимости от производственных условий применяют звонки либо сирены и ревуны.

1.3.4. Система автоматической блокировки

Система автоматической блокировки служит для защиты участка оборудования от неправильных действий обслуживающего персонала либо его отключения при аварийном отключении предыдущих или последующих участков технологического процесса.

Различают две группы блокировок:

запретно-разрешающую – устраняет возможность неправильных или несвоевременных включений и отключений механизмов, а также устраняет несоблюдение установленной технологическими требованиями очередности пуска и остановки различных механизмов оборудования технологического процесса. Такая блокировка предусмотрена, например, при пуске компрессора холодильной установки, если не соблюден ряд технологических требований;

аварийную блокировку – предназначена для автоматического последовательного отключения механизмов, расположенных по ходу производственного процесса до механизма, подвергшегося аварийному отключению. Примером может служить последовательное отключение элементов холодильной системы при перегреве обмоток электродвигателя компрессора.

Технические средства автоматической блокировки: первичные преобразователи (датчики), усилители, коммутационная аппаратура и элементы сигнализации.

1.3.5. Система операторного дистанционного управления

Структурная схема системы операторного дистанционного управления показана на рис. 1.3.

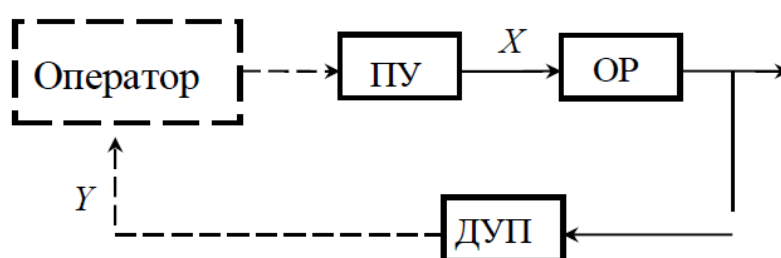


Рис. 1.3. Структурная схема системы:
ПУ – пост управления; ДУП – датчик указателя положения

Данная система предназначена для ручного управления на расстоянии регулирующими и запорными органами или отдельными механизмами. При автоматизации дистанционное управление применяется либо в качестве самостоятельного устройства (частичная автоматизация), либо в качестве устройства, действующего параллельно с автоматическим на одни и те же органы управления, как резерв при отключении автоматики. При дистанционном управлении регулирование осуществляется оператором по показаниям измерительного прибора, т. е. по датчику указателя положения рабочего органа через пост управления ПУ.

1.3.6. Система автоматического регулирования и управления

Структурная схема данной системы показана на рис. 1.4. Система предназначена для автоматического управления ходом технологического процесса без непосредственного участия оператора.

Чувствительный элемент обеспечивает преобразование регулируемого параметра Y в сигнал, удобный для дальнейшей обработки.

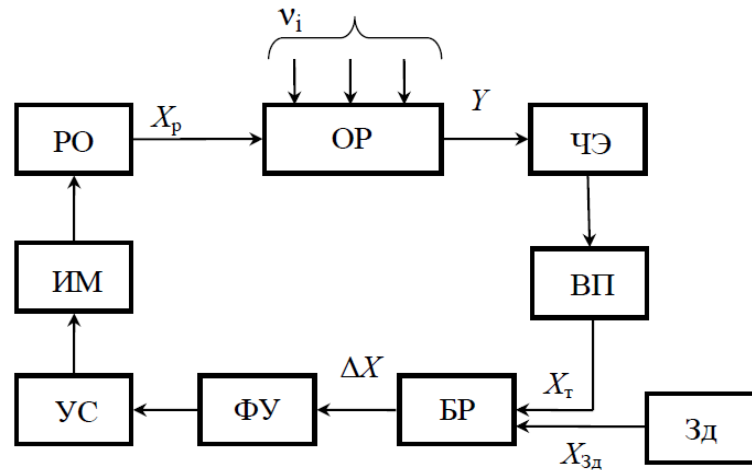


Рис. 1.4. Структурная схема системы:

ОР – объект регулирования; ЧЭ – чувствительный элемент; ВП – вторичный преобразователь; БР – блок рассогласования; Зд – задатчик; ФУ – формирующее устройство; УС – усилитель; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган

Вторичный преобразователь формирует унифицированные сигналы по государственной системе приборов (ГСП), которая будет рассмотрена далее. Задатчиком задается требуемое значение регулируемого параметра Y , он формирует сигнал $X_{зд}$ (X – заданное), который в блоке рассогласования сравнивается с действительным значением регулируемого параметра X_t (X – текущее), в результате чего на вход формирующего устройства (ФУ) поступает сигнал рассогласования:

$$\Delta X = \pm |X_{зд} - X_t|.$$

В зависимости от требований к качеству регулирования с выхода ФУ поступает сигнал на усилитель для усиления мощности до значения, необходимого для срабатывания исполнительного механизма, который через регулирующий орган обеспечивает изменение потока энергии или материального потока в объект регулирования в виде регулирующего воздействия X_p .

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Регулирование – это стабилизация выходных параметров объекта управления относительно заданных значений либо их изменение по заданному закону. Под объектом управления (ОУ) понимается объект, в котором обеспечивается какой-то технологический процесс с определенными технологическими параметрами.

В общем случае на ОУ (рис. 2.1) действуют регулирующее воздействие X_p и возмущающие воздействия v_i , которые приводят к изменению регулируемого параметра Y . Воздействия v_i могут быть внешними, внутренними и параметрическими. Применительно к холодильной камере, например, внешними возмущениями могут быть внешние теплопритоки через наружные и внутренние ограждения камеры. Источниками внутренних возмущений являются теплопритоки от хранимого груза, осветительных приборов камеры, работающих в камере людей, электродвигателей воздухоохладителей, автопогрузчиков.

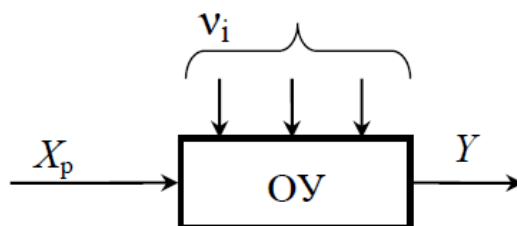


Рис. 2.1. Схема воздействия внешних факторов на объект управления

Параметрические возмущения проявляются в виде изменения коэффициентов теплопередачи теплообменных аппаратов (снеговая шуба и замасливание внутренней поверхности испарителей, водяной камень в конденсаторе, ржавчина его наружной поверхности и т. д.). Управление может быть ручным (операторное управление) и автоматическим. В последнем случае объект управления находится в замкнутом контуре, образуя в совокупности с автоматическим устройством автоматическую систему регулирования.

2.1. Классификации систем регулирования

Системы регулирования классифицируются по следующим признакам: по принципу регулирования, по числу регулируемых параметров, по назначению, характеру регулирующих воздействий, виду статической характеристики регулятора.

2.1.1. Классификация по принципу регулирования

Классификация по возмущению (разомкнутые системы) – рис. 2.2. Типовое значение возмущения v_T выставлено на входе автоматического регулятора (АР). Сигнал X_p формируется быстро, но при этом не учитываются все возмущения v_i , действующие на ОУ. Параметр « Y » не контролируется и не участвует в процессе регулирования, поэтому система называется разомкнутой.

Классификация по отклонению (замкнутая система) – рис. 2.3. На автоматическом регуляторе выставляется требуемое значение $X_{зд}$. Автоматическое регулирование формирует регулирующее воздействие X_p на объект управления, в результате чего параметр Y будет стремиться к его заданному значению $X_{зд}$. Сигнал X_p определяется степенью отклонения регулируемого параметра Y от $X_{зд}$, поэтому такая система является замкнутой.

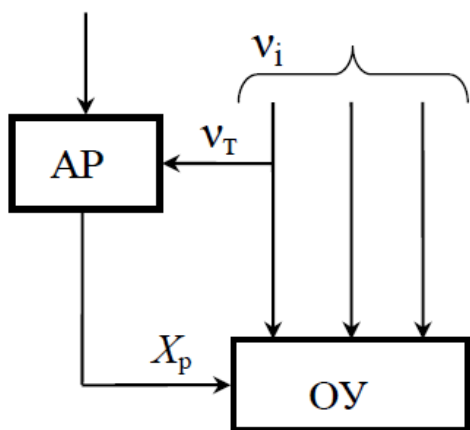


Рис. 2.2. Разомкнутая система

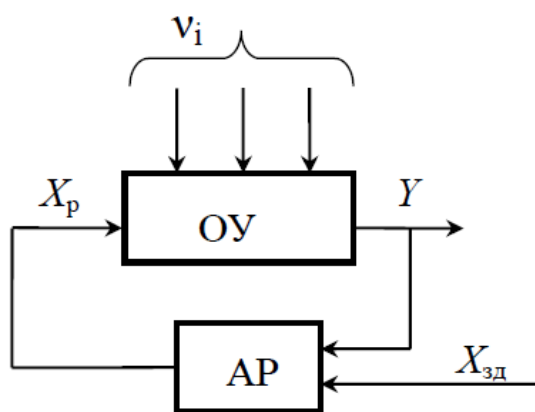


Рис. 2.3. Замкнутая система

В качестве примера на рис. 2.4 изображена упрощенная схема регулирования температуры воздуха холодильной камеры [4]. Датчик температуры (ДТ) установлен в холодильной камере. На автоматическом регуляторе устанавливается требуемое значение температуры воздуха камеры $X_{зд}$.

При отклонении действительного значения температуры Y от заданного значения АР формирует регулирующее воздействие X_p , которое определяет степень открытия либо закрытия регулирующего органа (РО), который стоит на линии подачи хладоносителя в теплообменный аппарат. Недостаток этой системы в том, что АР работает только тогда, когда уже есть разность между Y и $X_{зд}$.

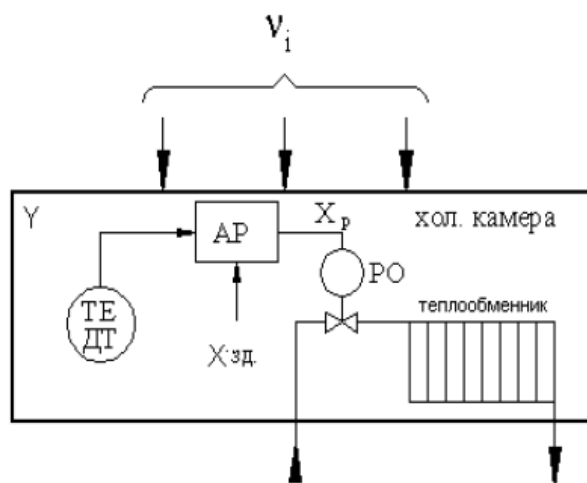


Рис. 2.4. Упрощенная схема регулирования температуры воздуха холодильной камеры

Комбинированные системы представляют собой сочетание разомкнутой и замкнутой систем, в результате чего основные возмущения компенсируются разомкнутой системой, а дополнительные – замкнутой. В холодильных установках такие системы практически не применяются, поэтому в данном учебном пособии они не рассматриваются.

2.1.2. Классификация по числу регулируемых параметров

Одномерные системы – имеют один регулируемый параметр.

Многомерные системы – имеют несколько выходных регулируемых параметров, причем они подразделяются на системы несвязанного регулирования (выходные параметры не связаны между

собой) и связанного регулирования (выходные параметры связаны между собой, например температура и влажность воздуха холодильной камеры).

2.1.3. Классификация по назначению

Системы стабилизации ($X_{зд}(t) = \text{const}$) – требуется поддерживать постоянное значение регулируемого параметра $Y(t)$ во времени t .

Системы программного управления ($X_{зд} = f(t)$) – регулируемый параметр $Y(t)$ нужно изменять по заданной временной программе, соответствующей требуемым условиям технологического процесса.

Следящие системы ($X_{зд} = f(t, \xi)$) – характер изменения $X_{зд}(t)$ зависит от внешних условий ξ . Примером следящей системы может быть положение стрелки на температурной шкале автоматического моста в зависимости от значения измеряемой температуры, которая может изменяться в зависимости от внешних условий ξ , что является случайной величиной.

2.1.4. Классификация по характеру регулирующих воздействий

По данному признаку системы могут быть непрерывными, релейными и импульсными.

В непрерывных системах $X_{зд}(t)$ и $Y(t)$ непрерывны во времени.

В релейных системах регулирования в контуре содержится релейное звено, которое преобразует непрерывную величину $X_{зд}(t)$ в дискретную, имеющую только два значения – минимальное и максимальное. Эти системы получили наибольшее распространение в холодильной технике.

В импульсных системах контур регулирования имеет импульсное звено, преобразующее непрерывное значение $X_{зд}(t)$ в последовательность импульсов, причем от $X_{зд}(t)$ зависят амплитуда, длительность и скважность импульса.

2.1.5. Классификация по виду статической характеристики регулятора

По указанному признаку бывают линейные и нелинейные системы регулирования.

2.2. Уравнения статики и динамики автоматических систем

Понятия о передаточных функциях

2.2.1. Уравнение статики

Уравнением статики автоматической системы или ее элементов называется математическая зависимость $Y_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$ в установившемся режиме, т. е. при $t \rightarrow \infty$. Эти уравнения могут быть линейными, типа $Y_{\text{вых}} = kX_{\text{вх}} + b$, и нелинейными, когда $Y_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$ является нелинейной функцией.

2.2.2. Уравнение динамики

Уравнение динамики – это математическая зависимость $Y_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}}, t)$ во времени при определенном виде входного воздействия. Наиболее распространенными видами входных воздействий являются единичное воздействие – $X_{\text{зд}} = 1(t)$ и гармоническое воздействие – $X_{\text{зд}} = X_m \sin(\omega t + \varphi)$, где X_m , ω , φ – амплитуда, круговая частота и начальная фаза входного воздействия, соответственно.

Примером единичного воздействия в холодильных системах может быть реакция температуры поверхности испарителя при включении и выключении дополнительного компрессора. За гармоническое воздействие можно принять зависимость теплопритоков через внешние ограждения холодильной камеры в зависимости от времени суток, а еще существеннее – времени года, если условно можно принять изменение солнечной радиации по гармоническому закону. Реакция выходного параметра $Y_{\text{вых}}(t)$ на единичное задающее воздействие называется переходной характеристикой, а реакция на гармоническое воздействие – частотной характеристикой. Поведение во времени автоматической системы и ее элементов отражает дифференциальное уравнение, которое может быть получено экспериментальным или аналитическим путем. Из полученного дифференциального уравнения получают уравнения статики и динамики исследуемой системы.

Рассмотрим пример составления упрощенного дифференциального уравнения для теплового объекта, например холодильной камеры. Для теплового объекта характерны теплопритоки $Q_{\text{пр}}$ и холодопроизводительность приборов охлаждения $Q_{\text{от}}$. Тогда накопление тепловой энергии в объекте за время Δt

$$C \Delta\theta = (Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}}) \Delta t, \quad (2.1)$$

где C – коэффициент, характеризующий способность теплового объекта аккумулировать теплоту,

$$C = M c_p,$$

здесь M – масса объекта; c_p – его теплоемкость; $\Delta\theta$ – изменение температуры теплового объекта.

При $\Delta t \rightarrow 0$ в пределе имеем

$$(Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}}) = C d\theta/dt. \quad (2.2)$$

В первом приближении $Q_{\text{от}} = a\theta$, где a – коэффициент пропорциональности, тогда

$$C d\theta/dt + a\theta = Q_{\text{пр}}, \quad (2.3)$$

или

$$T d\theta/dt + \theta = K Q_{\text{пр}}, \quad (2.4)$$

где $T = C/a$; $K = 1/a$.

Уравнение (2.4) – дифференциальное уравнение первого порядка, причем левая часть характеризует свободное движение системы, а правая – возмущающие воздействия. Коэффициент T характеризует инерционность системы и имеет размерность времени, а K – коэффициент передачи, или степень влияния, возмущающего воздействия на выходной параметр.

Связь между входными и выходными параметрами удобно рассматривать через передаточные функции. При этом временная $f(t)$ функция («оригинал») через преобразование Лапласа имеет соответствие функции комплексной переменной $F(P)$, которая называется «изображением»:

$$L f(t) = F(P) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-Pt} dt, \quad (2.5)$$

где $L[f(t)]$ – преобразование Лапласа; P – оператор Лапласа (комплексная переменная).

По преобразованию Лапласа дифференцированию оригинала $f(t)$ по переменной t соответствует операция умножения изображения $F(P)$ на комплексную переменную « P », а интегрирование $f(t)$ сводится к делению на оператор « P », причем $P = \pm \alpha \pm j\omega$, где α , $j\omega$ – действительная и мнимая части. Это позволяет дифференциальное уравнение, записанное относительно искомой функции $f(t)$, заменить в пространстве изображений на алгебраическое уравнение относительно изображения $F(P)$. Для определения искомого решения исходного уравнения используют обратное преобразование Лапласа:

$$f(t) = L^{-1} F(P) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha-j\omega}^{\alpha+j\omega} F(P) e^{Pt} dt. \quad (2.6)$$

Для определения $F(P)$ и $f(t)$ используют специальные таблицы [1], в которых приводится соответствие типовой временной функции $f(t)$ функции комплексной переменной $F(P)$.

Например,

$$e^{-\alpha t} \div \frac{1}{P + \alpha}; \quad \frac{1}{(P + \alpha)(P + \beta)} \div \frac{e^{-\alpha t} + e^{-\beta t}}{\beta - \alpha}; \quad (2.7)$$

$$\frac{\omega}{P^2 + \omega^2} \div \sin(\omega t); \quad \frac{P}{P^2 + \omega^2} \div \cos(\omega t); \quad (t - \alpha) \div e^{\alpha P}, \quad (2.8)$$

где знак « $\div$ » обозначает соответствие.

Под передаточной функцией понимается отношение «изображения» выходного параметра к «изображению» входного.

Так, уравнение (2.4) можно записать в виде

$$[TP\theta(P) + \theta(P)] = KQ_{\text{пр}}(P), \text{ или } [TP + 1]\theta(P) = KQ_{\text{пр}}(P); \quad (2.9)$$

передаточная функция $W(P)$ определяется из выражения (2.9):

$$W(P) = X_{\text{вых}}(P)/X_{\text{вх}}(P) = \theta(P)/Q_{\text{пр}}(P) = K/TP + 1. \quad (2.10)$$

По таблице Лапласа с учетом начального значения θ_0 находим временную функцию $\theta(t)$:

$$\theta(t) = \theta_0 K(1 - e^{(-1/T)t}). \quad (2.11)$$

Статическая характеристика из передаточной функции (2.10) определится при $P = 0$, что соответствует во временной плоскости $t \rightarrow \infty$.

2.3. Типовые динамические звенья систем автоматического регулирования

Ряд физических процессов, различных по своей природе, описываются дифференциальными уравнениями одинаковой структуры. Например, плотность теплового потока q в направлении X в установившемся режиме описывается уравнением Фурье:

$$q = -\lambda (dT/dx), \quad (2.12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт(м·К); T – распределенная по телу температура.

Перенос количества электричества j в единицу времени по проводнику с распределенным сопротивлением ρ описывается уравнением Ома в дифференциальной форме:

$$J = (-1/\rho) (dV/dx), \quad (2.13)$$

где V – падение напряжения по длине проводника.

В приведенных физических законах очевидна одинаковая форма математических выражений (2.12) и (2.13). Такие соотношения называются изоморфными.

На базе изоморфности в теории автоматического управления выделены типовые дифференциальные уравнения, которые описывают динамические свойства широкого класса физических явлений. Условно физические процессы, описываемые дифференциальными уравнениями одинаковой структуры, выделены в виде динамических звеньев. Различают следующие основные динамические звенья: безынерционные, инерционные, колебательные, астатические, транспортные запаздывания.

2.3.1. Безынерционные звенья

Безынерционные звенья – это такие звенья, у которых функциональная связь между входными и выходными параметрами реализуется мгновенно, т. е. без сдвигов во времени. Примером могут

быть металлический рельс и перемещение его плеч под действием силы F (рис. 2.5):

$$Y(t) = kx(t); \quad Y(p) = kX(p); \quad (2.14)$$

$$W(p) = Y(p)/X(p) = k, \quad (2.15)$$

где $Y(t)$ – переходная функция, показана на рис. 2.5 при единичном воздействии $x(t) = 1(t)$.

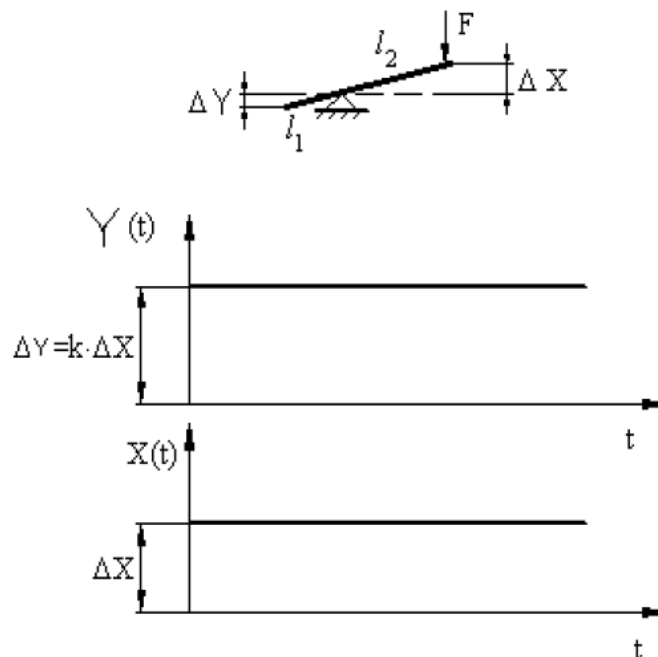


Рис. 2.5. Пример функционирования безынерционного звена

2.3.2. Инерционные звенья (звенья с самовыравниванием)

Звено I порядка (апериодическое звено). Это звено, у которого переход из одного установившегося значения в другое осуществляется за конечный промежуток времени. Задержка в передаче воздействия обусловлена накоплением и возвратом энергии каким-то аккумулярующим звеном. В качестве аккумулятора энергии могут выступать: инерционные массы движущегося тела; упругие свойства материала; теплопоглощающая масса нагреваемых или охлаждаемых тел.

Дифференциальное уравнение линейного звена имеет вид

$$T (dy/d\tau) + y = kx,$$

или в операторной форме

$$TpY(p) + Y(p) = kX(p), \quad W(p) = Y(p)/X(p) = k/Tp + 1. \quad (2.16)$$

Для нелинейного звена нужно брать приращения Δx и Δy в области малых отклонений. Характеристическое уравнение этой передаточной функции будет $TP + 1 = 0$, а его корень $\lambda = -1/T$:

$$h(t) = C_1 e^{-\lambda t} = C_1 e^{(-1/T)t} = kx_0 (1 - e^{(-1/T)t}), \quad (2.17)$$

где $h(t)$ – обозначение переходной функции в общем виде; C_1 – постоянная интегрирования, зависящая от начальных условий.

В зависимости от начальных условий процесс может проходить по кривой 1 или 2 (рис. 2.6).

По переходной характеристике определяются инерционность T звена и коэффициент передачи k . Инерционность, или постоянная времени T , определяется по графику на рис. 2.6 как отрезок времени на временной оси, отсекаемый касательной, проведенной к началу изменения переходной характеристики до пересечения с установившимся значением $Y(t)$. Процесс считается установившимся на 95 % через $t = 3T$, а при $t = 5T$ процесс устанавливается до уровня 99 %.

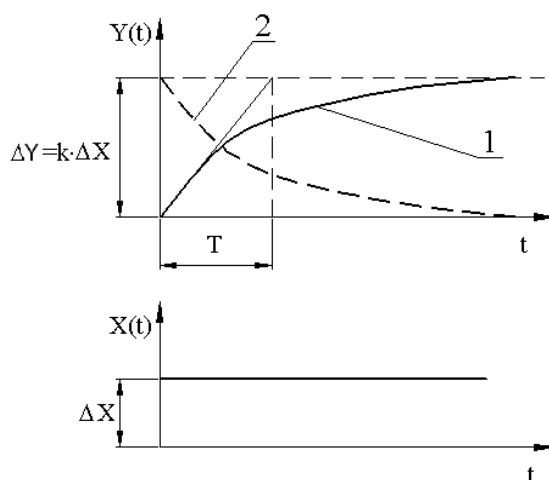


Рис. 2.6. Пример действия инерционных звеньев

Примером звена I порядка может служить холодильная камера с воздухоохладителями, в которой возмущающим воздействием является хранимый груз, а выходным – температура воздуха камеры при неизменной холодопроизводительности холодильной машины.

Апериодическое звено II порядка. Такое звено описывается дифференциальным уравнением вида

$$T_2^2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + T_1 \frac{dY}{dt} + Y = kx, \quad (2.18)$$

где T_1 и T_2 – коэффициенты, которые в совокупности характеризуют инерционность звена и время запаздывания между единичным воздействием X и реакцией Y на это воздействие при необходимом условии $T_1 \geq 2T_2$.

В операторной форме

$$T_2^2 P^2 Y(P) + T_1 P Y(P) + Y(P) = kx(p). \quad (2.18a)$$

Передаточная функция имеет вид

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{k}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}. \quad (2.19)$$

График переходной характеристики показан на рис. 2.7.

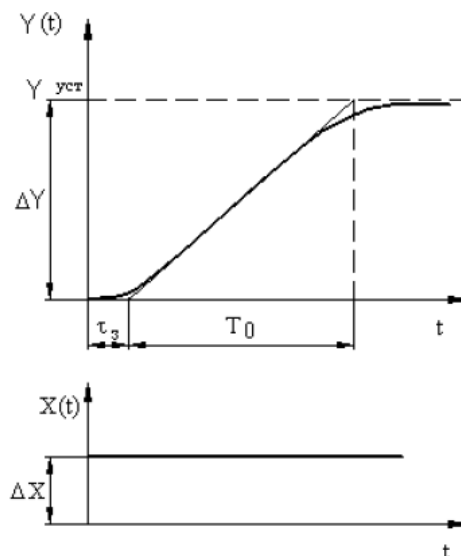


Рис. 2.7. График переходной характеристики

Переходная характеристика (см. рис. 2.7)

$$h(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (2.19a)$$

где $\lambda_{1,2}$ – корни характеристического уравнения $T_2^2 P^2 + T_1 P + 1 = 0$, а C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, значения которых зависят от начальных условий Y_0 .

Примером звена II порядка может служить изменение температуры воздуха в центре холодильной камеры при «тихой» системе охлаждения (за счет свободной конвекции).

2.3.3. Колебательные звенья

Если корни характеристического уравнения для звена II порядка комплексные, что может быть при условии $T_1 < 2T_2$, то апериодическое звено вырождается в колебательное звено с передаточной функцией

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{k}{T^2 P^2 + 2\xi T P + 1}, \quad (2.20)$$

где $\xi = \frac{T_1}{2T_2}$, $0 \leq \xi \leq 1$ – коэффициент затухания;

$$h(t) = -Ae^{-\xi t} \sin(\omega t + \varphi),$$

здесь ξ и ω – вещественная и мнимая части корней характеристического уравнения:

$$\lambda_{1,2} = \xi \pm j\omega,$$

причем ξ характеризует затухание в колебательной системе, а ω – частоту колебаний.

На рис. 2.8 дан график переходной характеристики для колебательного звена. Примером такого звена может служить перемещение поршня компрессора при выключении электропривода.

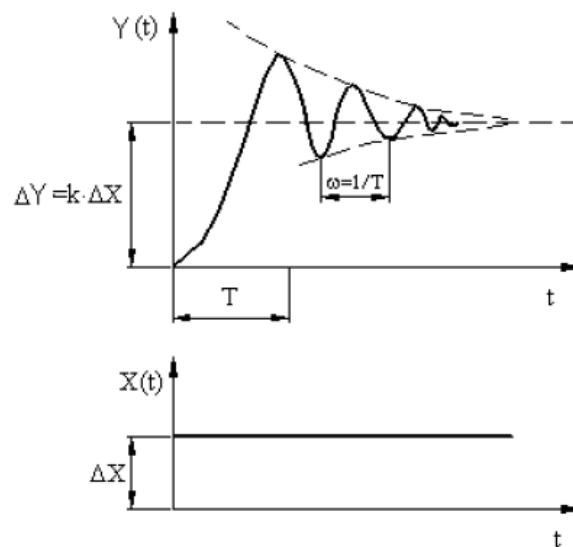


Рис. 2.8. График переходной характеристики для колебательного звена

2.3.4. Астатические (интегрирующие) звенья

Астатические звенья – это звенья без самовыравнивания, т. е. при сколь угодно малом управляющем или возмущающем воздействии на входе выходной параметр теоретически стремится к бесконечности. Примером может служить емкость постоянного поперечного сечения, заполняемая жидкостью или сыпучим материалом, если в качестве входного параметра выбрать приток, а выходного – уровень. Дифференциальное уравнение для таких звеньев запишется в виде

$$dy/dt = kx;$$

в операторной форме –

$$PY(p) = kX(p),$$

где k – коэффициент передачи интегратора.

Передаточная функция

$$W(P) = Y(p) / X(p) = k/p = 1/Tr, \quad (2.21)$$

где $T = 1/k$ – постоянная времени интегрирования, которая определяет угол наклона линейной функции относительно оси времени, т. е. $\varphi = \arctg 1/T$;

$$Y(t) = (1/T)t.$$

На рис. 2.9 показана переходная характеристика интегрирующего звена; график переходной характеристики $Y(t)$ – на рис. 2.10.

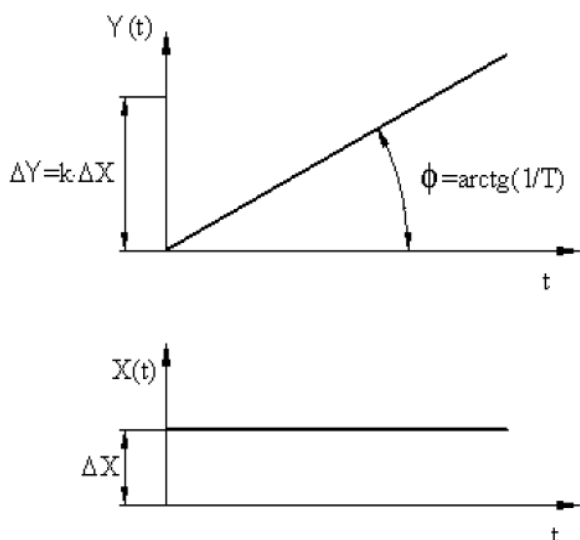


Рис. 2.9. Переходная характеристика интегрирующего звена

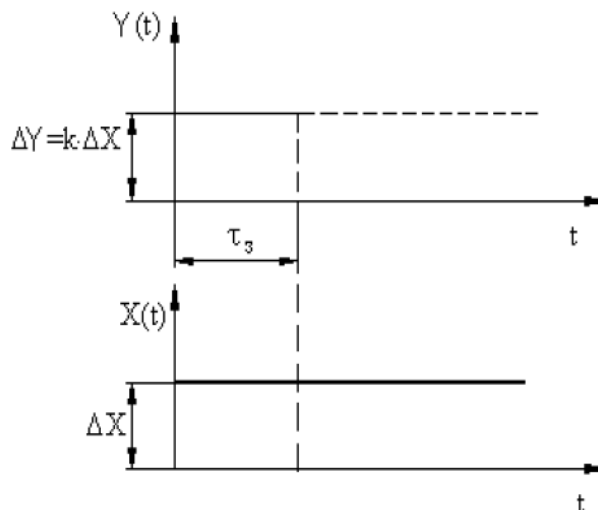


Рис. 2.10. График переходной характеристики

2.3.5. Звено транспортного запаздывания

Примером звена транспортного запаздывания может служить перемещение изделия на транспортере (транспортный конвейер), протекание жидкости или газа по длине трубопровода.

Уравнение такого звена имеет вид

$$Y(t + \tau_3) = kX; \quad (2.22)$$

передаточная функция

$$W(P) = Y(p) / X(p) = e^{-\tau_3 P}, \quad (2.23)$$

где τ_3 – время запаздывания выходного параметра $Y(t)$ относительно входного параметра $X(t)$.

2.4. Основные правила соединения динамических звеньев

2.4.1. Последовательное соединение звеньев

Передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций этих звеньев (рис. 2.11):

$$Y(P) = W_1(P) W_2(P) \dots W_n(P) = \prod_{j=1}^n W_j(P). \quad (2.24)$$



Рис. 2.11. Последовательное соединение звеньев

2.4.2. Параллельное соединение звеньев

Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций этих звеньев (рис. 2.12):

$$Y(P) = W_1(P) + W_2(P) + \dots + W_n(P) = \sum_{j=1}^n W_j(P). \quad (2.25)$$

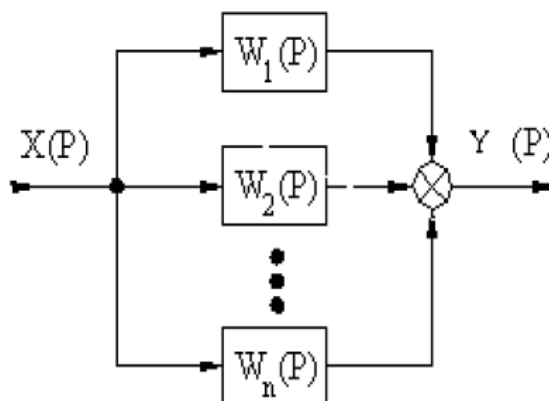


Рис. 2.12. Параллельное соединение звеньев

2.4.3. Встречно-параллельное включение звеньев

Это звенья или системы с положительной либо отрицательной обратной связью (рис. 2.13):

$$W(P) = W_1(P) / 1 \pm W_{oc}(P) W_1(P). \quad (2.26)$$

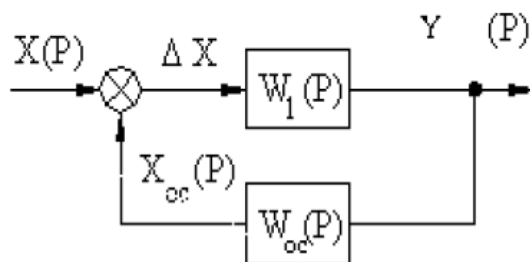


Рис. 2.13. Встречно-параллельное включение звеньев

Знак «+» соответствует положительной обратной связи, а знак «−» – отрицательной обратной связи. Если полярность или фаза сигналов $X(p)$ и $X_{oc}(p)$ совпадают, то это соответствует положительной обратной связи. При противоположных значениях полярности либо фазы этих сигналов имеет место отрицательная обратная связь. Примером отрицательной обратной связи может быть включение дополнительного компрессора или увеличение холодопроизводительности винтового компрессора при увеличении температуры воздуха холодильной камеры. При положительной обратной связи, по ошибке оператора либо из-за неисправности системы регулирования, при повышении температуры воздуха камеры уменьшается холодопроизводительность компрессора.

2.5. Математические модели объектов управления и методы их получения

Автоматизация любого объекта предполагает решение основных и вспомогательных задач. Например, для холодильной установки основной задачей автоматизации является поддержание температуры рабочей среды в заданных пределах при известных изменениях

внешних возмущений. К вспомогательным задачам следует отнести защиту от опасных режимов работы установки, питание испарителей, стабилизацию температуры конденсации и т. д. В любом случае при автоматизации необходимо знать математическую модель объекта управления, которая может быть получена аналитическим или экспериментальным путем [5].

Аналитический способ получения модели объекта пригоден при условии хороших знаний физических процессов, протекающих в объекте управления, но в любом случае этот способ дает приближенную модель, так как она не может отразить все малые параметры, свойственные этому объекту. Примером аналитического метода получения модели может служить тепловой объект, который был рассмотрен в подразд. 2.1–2.4.

Экспериментальный метод получения модели объекта может быть пассивным и активным. При пассивном методе не нужно формировать искусственные возмущения, а надо использовать реальные текущие режимы работы установки. Например, загрузка холодильной камеры теплым грузом при неизменной холодопроизводительности установки приведет к повышению температуры воздуха камеры, измеряя которую в нескольких точках во времени и усредняя полученные значения, можно получить разгонную (переходную) характеристику изменения температуры во времени. Обработав полученную характеристику на ЭВМ или вручную, получим передаточную функцию объекта.

При активном эксперименте на объекте специально формируют возмущающие воздействия, а затем, как и при пассивном эксперименте, получают разгонную характеристику во времени, которая подлежит дальнейшей обработке.

Все объекты по своим динамическим свойствам делятся на статические (объекты с самовыравниванием) и астатические (объекты без самовыравнивания). При единичном возмущении на статическом объекте его выходной параметр стремится к новому установившемуся значению. Таким свойством обладают все тепловые объекты, у которых экспериментальная переходная характеристика обычно имеет вид как на рис. 2.7 при единичном воздействии $\Delta X(t)$. Полученную характеристику можно аппроксимировать произведением двух передаточных функций – звена с запаздыванием τ_3 и экспонентой I порядка с постоянной времени T_0 :

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{k_0 e^{-\tau_3 P}}{1 + T_0 P}, \quad (2.27)$$

где $k_0 = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$ – коэффициент передачи объекта, а T_0 – постоянная времени объекта, которая характеризует его инерционность.

Для определения величин τ_3 и T_0 следует к точке перегиба переходной характеристики провести касательную до пересечения с установившимся значением $Y_{уст.}$

При единичном возмущении на астатическом объекте его выходной параметр стремится к бесконечности независимо от величин возмущающего воздействия. Классическим примером может служить изменение уровня жидкости в емкости постоянного сечения по высоте при сколь угодно малом притоке жидкости в этот сосуд. Типовая переходная характеристика реального астатического объекта имеет вид, показанный на рис. 2.14.

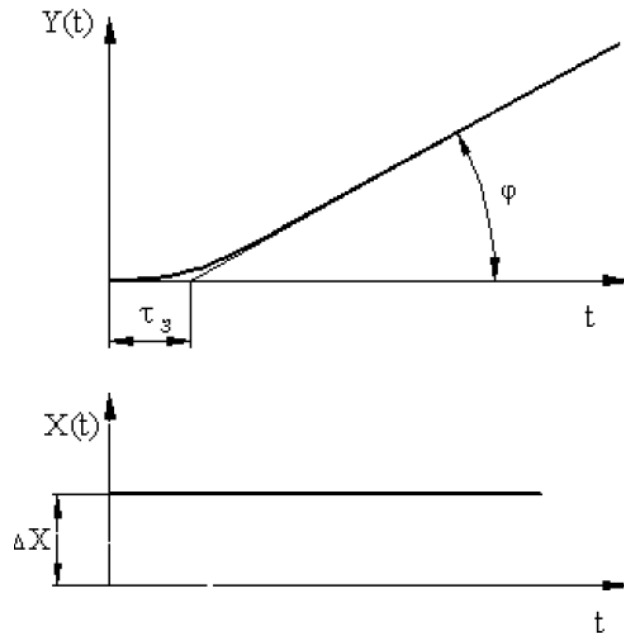


Рис. 2.14. Типовая переходная характеристика реального астатического объекта

Полученную характеристику можно аппроксимировать произведением двух передаточных функций – звена с запаздыванием τ_3 и идеального интегрирующего звена:

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{1}{T_0 P} e^{-\tau_3 P}, \quad (2.28)$$

где $1/T$ – коэффициент передачи интегратора, определяющий угол наклона характеристики относительно оси времени $\varphi = \arctg(1/T)$.

Для определения τ_3 следует продолжить линейный участок переходной характеристики до пересечения с осью времени.

Пример аналитического способа получения математической модели холодильной камеры хранения продукта с принудительной системой охлаждения рассмотрен на рис. 2.15.

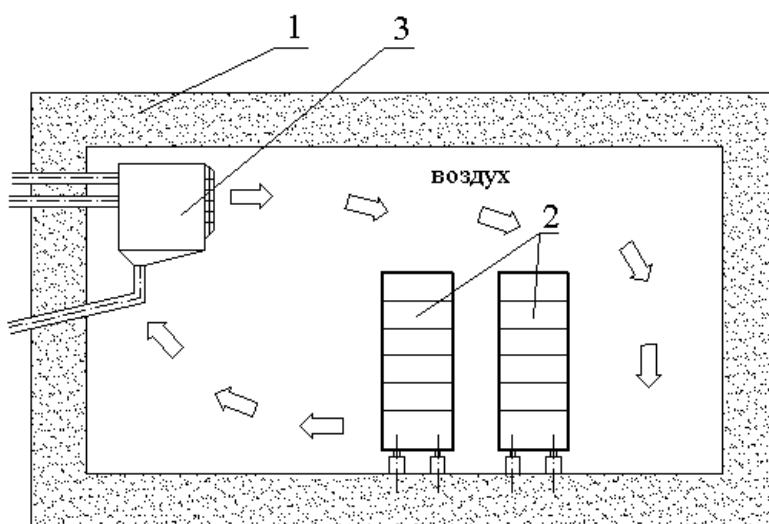


Рис. 2.15. Модель холодильной камеры хранения продукта с принудительной системой охлаждения:

1 – ограждение камеры; 2 – хранимый груз; 3 – воздухоохладитель

При составлении модели считаем холодопроизводительность воздухоохладителя постоянной и учитываем только теплопритоки от ограждения $Q_{огр}$ и хранимого груза $Q_{гр}$. Тогда за элементарное время Δt температура воздуха камеры изменится за счет теплопритоков на величину Δt_k .

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{к}} = (Q_{\text{огр}} + Q_{\text{гр}}) \Delta \tau, \quad (2.29)$$

где $V_{\text{в}}$, $\rho_{\text{в}}$, $c_{\text{в}}$ – объем воздуха камеры, его плотность и удельная теплоемкость, соответственно.

Раскроем правую часть уравнения (2.29):

$$Q_{\text{огр}} = \alpha_{\text{огр}} F_{\text{огр}} (t_{\text{огр}} - t_{\text{к}}); \quad (2.30)$$

$$Q_{\text{гр}} = \alpha_{\text{гр}} F_{\text{гр}} (t_{\text{гр}} - t_{\text{к}}).$$

Подставив выражения (2.30) в (2.29), получим в приращенных $\Delta t_{\text{гр}}$ и $\Delta t_{\text{огр}}$:

$$V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{к}} = ((\alpha F)_{\text{огр}} \Delta t_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}} \Delta t_{\text{гр}} - (\alpha F)_{\text{огр}} \Delta t_{\text{к}} - (\alpha F)_{\text{гр}} \Delta t_{\text{к}}) \Delta \tau,$$

или при $\Delta \tau \rightarrow 0$ получим

$$\begin{aligned} V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} (d \Delta t_{\text{к}} / d\tau) + ((\alpha F)_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}}) \Delta t_{\text{к}} = \\ = (\alpha F)_{\text{огр}} \Delta t_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}} \Delta t_{\text{гр}}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Поделим левую и правую части уравнения (2.31) на $(\alpha F)_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}}$:

$$T (d \Delta t_{\text{к}} / d\tau) + \Delta t_{\text{к}} = k_1 \Delta t_{\text{огр}} + k_2 \Delta t_{\text{гр}}, \quad (2.32)$$

где T – постоянная времени воздуха холодильной камеры, имеющая размерность времени и характеризующая ее инерционность,

$$T = \frac{V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}}{(\alpha F)_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}}};$$

k_1 – коэффициент, учитывающий степень влияния изменения температуры внутренней поверхности ограждения на температуру воздуха камеры,

$$k_1 = \frac{(\alpha F)_{\text{огр}}}{(\alpha F)_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}}};$$

k_2 – коэффициент, учитывающий степень влияния изменения температуры хранимого груза на температуру воздуха камеры,

$$k_2 = \frac{(\alpha F)_{\text{гр}}}{(\alpha F)_{\text{огр}} + (\alpha F)_{\text{гр}}}.$$

Передаточные функции на основании выражения (2.32) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} W_1(P) &= \Delta t_{\text{огр}}(P) / \Delta t_{\text{к}}(P) = k_1 / TP + 1; \\ W_2(P) &= \Delta t_{\text{гр}}(P) / \Delta t_{\text{к}}(P) = k_2 / TP + 1. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Из (2.33) следует, что упрощенно передаточная функция холодильной камеры может быть представлена в виде суммы двух передаточных функций:

$$W_1(P) + W_2(P) = W_{\text{к}}(P).$$

Из приведенных расчетов видно, что полученная математическая модель является приближенной, так как она не учитывает ряд других теплопритоков: от работающих в камере людей, от осветительных приборов, от привода воздухоохладителя и т. д. Более точную модель можно получить только экспериментальным путем, пример которого был описан ранее.

2.6. Частотные характеристики динамических звеньев

Частотные характеристики используются при анализе и синтезе автоматических систем. При подаче на вход любого динамического звена или их соединений синусоидальных колебаний

$$X = A_m \sin(\omega t)$$

на выходе также установятся синусоидальные колебания, но с измененными амплитудой и фазой:

$$Y = A_1 \sin(\omega t + \varphi),$$

причем A и φ будут изменяться при изменении частоты ω . Таким образом, зависимости $A_1(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ будут называться, соответственно, амплитудно-частотными и фазочастотными характеристиками.

Частотные характеристики можно получить экспериментальным путем, подавая гармонические колебания на вход исследуемого объекта, но их легко получить и расчетным путем через передаточную функцию исследуемой системы заменой оператора P на его мнимую часть $j\omega$. В этом случае передаточная функция вырождается в комплексный коэффициент передачи $W(j\omega)$. Рассмотрим типовые динамические звенья [1].

2.6.1. Аperiodическое звено I порядка

При аperiodическом звене I порядка

$$W(P) = k/TP + 1; \quad W(j\omega) = k/(j\omega T + 1).$$

Комплексный коэффициент передачи характеризует изменение амплитуды по модулю Mod , а по аргументу $\arg$ – сдвиг фазы с изменением частоты ω :

$$\text{Mod } |W(j\omega)| = A = \left| \frac{k}{j\omega T + 1} \right| = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}}; \quad (2.34)$$

$$\varphi = \arg \left(\frac{k}{j\omega T + 1} \right) = \arg(k) - \arg(j\omega T + 1) = -\text{arctg}(\omega T).$$

По полученным выражениям можно получить (кроме $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$) амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) (рис. 2.16).

Амплитудно-фазочастотная характеристика строится в полярных координатах $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ и имеет вид полуокружности, диаметр которой равен статическому коэффициенту усиления K . Каждая точка характеристики соответствует значениям A и φ при определенной частоте ω . Из графиков видно, что на низких частотах, где $A(\omega)$ близко к K , звено хорошо пропускает колебания, а на повышенных частотах характеристика резко падает, устремляясь к нулю.

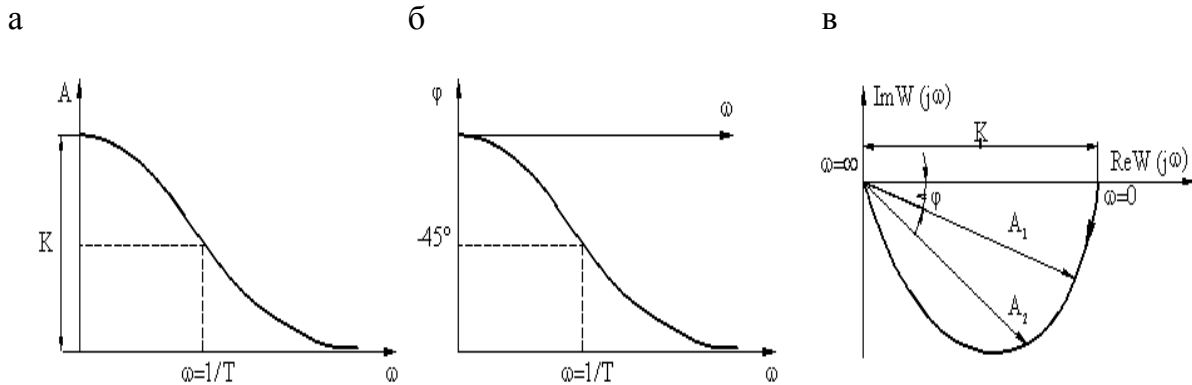


Рис. 2.16. Характеристики:

а – амплитудная; б – частотная; в – амплитудно-фазочастотная

Таким образом, звено характеризуется полосой пропускания, равной $0 \leq \omega \leq 1/T$, причем при

$$\omega = \frac{1}{T} \dots A = \frac{\sqrt{2}}{2} k.$$

По виду частотной характеристики можно судить о свойствах переходного процесса, длительность которого равна $3T$, а ширина полосы пропускания частот обратно пропорциональна T . Отсюда вывод: чем шире на частотной характеристике полоса пропускания, тем быстрее затухает переходной процесс.

2.6.2. Аperiodическое звено II порядка

При аperiodическом звене II порядка

$$W(P) = \frac{k}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)};$$

при $P = j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{k}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)};$$

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(\omega^2 T_1^2 + 1)(\omega^2 T_2^2 + 1)}};$$

$$\varphi = -\arctg(T_1 \omega) - \arctg(T_2 \omega).$$

Вид характеристики показан на рис. 2.17.

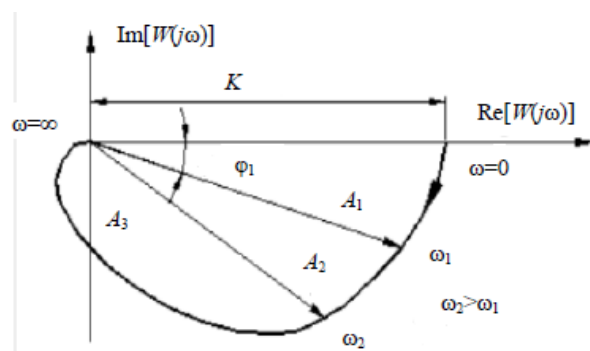


Рис. 2.17. Аperiodическое звено II порядка

2.6.3. Звено с запаздыванием

Для случая звена с запаздыванием

$$W(j\omega) = k e^{-j\omega\tau}; \quad \varphi = -\omega\tau \text{ (радиан)};$$

$$|W(j\omega)| = \sqrt{\sin^2(\omega\tau) + \cos^2(\omega\tau)} = 1.$$

Амплитудно-фазочастотная характеристика имеет вид полной окружности, периодически повторяющейся (рис. 2.18).

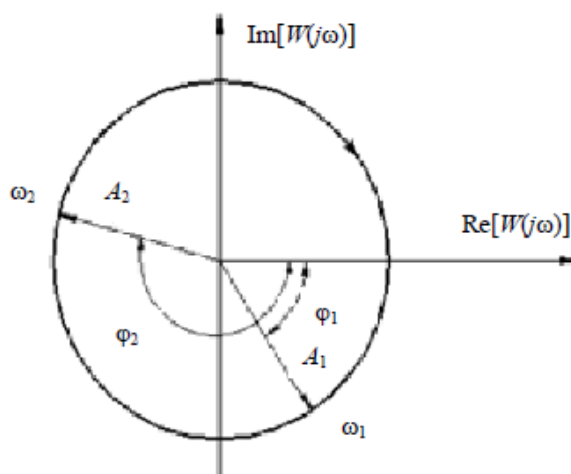


Рис. 2.18. Амплитудно-фазочастотная характеристика

2.7. Понятие об устойчивости САР

Для нормального функционирования система автоматического регулирования должна удовлетворять требованиям устойчивости. Система является устойчивой, если она возвращается к установившемуся состоянию после прекращения возмущающего воздействия, которое вывело ее из первоначального состояния [1]. Общее решение дифференциального уравнения САР может быть представлено в виде суммы двух функций времени:

$$X(t) = X_s(t) + X_d(t), \quad (2.35)$$

где $X_s(t)$ характеризует вынужденное движение системы и зависит от внешнего воздействия, а $X_d(t)$ определяет свободное движение или переходный процесс в системе после снятия единичного воздействия.

Для устойчивой системы необходимо, чтобы в пределе свободная составляющая $X_d(t)$ стремилась к нулю, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} X_d(t) = 0$ при $t \rightarrow \infty$. Функция $X_d(t)$ для линейной системы n -го порядка определяется как

$$X_d(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{\lambda_n t}, \quad (2.36)$$

где $c_1 \dots c_n$ – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями; $\lambda_1 \dots \lambda_n$ – корни характеристического уравнения системы.

Из выражения (2.36) видно, что $X_d(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ только в том случае, если все n корней характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части.

Существуют косвенные методы определения отсутствия корней с положительной вещественной частью. Наиболее распространенными методами являются алгебраический и частотный критерии. В свою очередь, к наиболее распространенным частотным критериям относятся критерии Найквиста и Михайлова.

2.7.1. Критерий Найквиста

Данный критерий основан на рассмотрении АФЧХ разомкнутой системы, по виду которой можно судить об устойчивости замкнутой системы. Амплитудно-фазочастотная характеристика $W(j\omega)$ строится расчетным путем на основании выражения для $W(P)$

разомкнутой системы при замене P на $j\omega$ с изменением ω от 0 до ∞ . Если разомкнутая система устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ $W(j\omega)$ не охватывала точку с координатами $(-1, j\omega)$ на вещественной оси.

На рис. 2.19 показан вид АФЧХ системы III порядка.

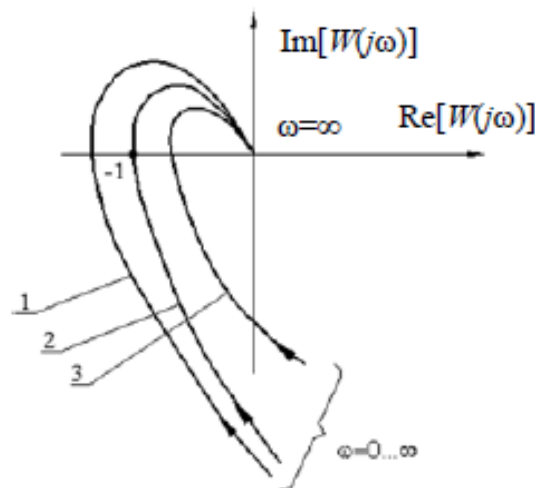


Рис. 2.19. Вид АФЧХ системы III порядка:
1 – неустойчивая; 2 – на границе устойчивости;
3 – устойчивая

2.7.2. Критерий Михайлова

Критерий основан на построении кривой Михайлова. Для устойчивости системы n -го порядка необходимо и достаточно, чтобы характеристическая кривая при изменении ω от 0 до ∞ , начиная с положительной вещественной оси, обошла последовательно в положительном направлении, т. е. против часовой стрелки, все n квадрантов. При этом характеристическое уравнение представлено в виде суммы вещественной и мнимой частей, т. е.

$$H(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega),$$

где $H(j\omega) = A(j\omega) + B(j\omega)$ в комплексном коэффициенте передачи $W(j\omega) = A(j\omega)/B(j\omega)$.

Придавая значения $\omega = 0 \dots \infty$, определяем значения $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ и строим в координатах $Y(X)$ кривую Михайлова. Так, для системы III порядка на рис. 2.20 построена кривая Михайлова.

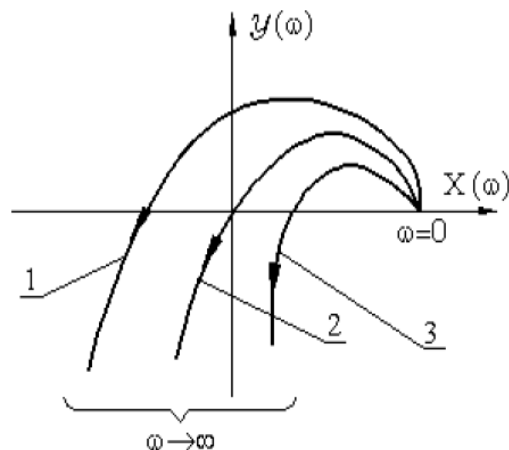


Рис. 2.20. Кривая Михайлова для системы III порядка:
1 – устойчивая; 2 – на границе устойчивости;
3 – неустойчивая

Рассмотрим численный пример определения устойчивости системы III порядка.

Определение устойчивости системы III порядка по критерию Найквиста.

Имеется передаточная функция САП III порядка вида [1]

$$W(P) = \frac{k}{P(1 + T_1 P)(1 + T_2 P)}, \quad (2.37)$$

т. е. система содержит одно интегрирующее звено с коэффициентом передачи k и два последовательно включенных апериодических звена с постоянными времени T_1 и T_2 . Примем $k = 100$, $T_1 = 0,02$ с и $T_2 = 0,1$ с.

Для построения АФЧХ разомкнутой системы определяем модуль и аргумент комплексного коэффициента передачи при замене оператора P на мнимую частоту $j\omega$, т. е.

$$W(P) = \frac{k}{j\omega(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} = \frac{100}{j\omega(1 + 0,02 j\omega)(1 + 0,1 j\omega)}.$$

Модуль комплексного коэффициента передачи

$$|W(j\omega)| = \left| \frac{k}{j\omega(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} \right| =$$

$$(2.38)$$

$$= \frac{k}{\omega \sqrt{1 + (\omega T_1)^2} \sqrt{1 + (\omega T_2)^2}} = \frac{100}{\omega \sqrt{1 + (\omega \cdot 0,02)^2} \sqrt{1 + (\omega \cdot 0,1)^2}}.$$

Аргумент

$$W(j\omega) = \varphi = \arg \frac{k}{j\omega(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)} =$$

$$= -\frac{\pi}{2} - \arctg 0,02\omega - \arctg 0,1\omega. \quad (2.39)$$

Аргумент $W(j\omega)$ получен путем деления мнимой части $W(j\omega)$ на вещественную с учетом того, что интегрирующее звено имеет постоянный фазовый сдвиг $-\omega/2$. В итоге имеем: $\varphi_1 = -\omega/2$; $\varphi_2 = -\arctg 0,02\omega$; $\varphi_3 = -\arctg 0,1\omega$.

Подставив значения $\omega = 0 \dots \infty$ в выражения (2.38) и (2.39), получим величины модуля и аргумента для АФЧХ, значения которых приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	5	10	15	25	50	100
Mod $W(j\omega)$	∞	18	6,9	3,6	1,3	0,3	0,04
φ_1	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°
φ_2	0°	-6°	-11°	-17°	-26°	-45°	-64°
φ_3	0°	-26°	-45°	-56°	-68°	-79°	-84°
$\sum \varphi$	-90°	-122°	-146°	-163°	-184°	-214°	-238°

По полученным данным построена АФЧХ, вид которой показан на рис. 2.21.

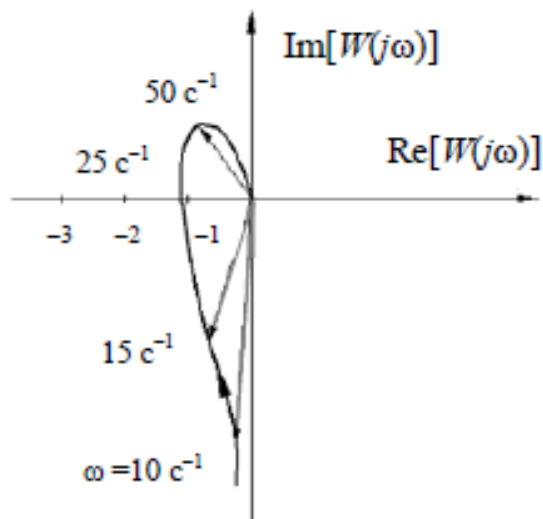


Рис. 2.21. Амплитудно-фазочастотная характеристика

Амплитудно-фазочастотная характеристика охватывает точку с координатами $(-1, j0)$, что соответствует неустойчивой системе.

Определение устойчивости системы III порядка по критерию Михайлова.

Имеется передаточная функция САР III порядка вида (2.37), но с другими значениями коэффициента k и постоянных времени T_1 и T_2 , а именно: $k = 58$; $T_1 = 0,01$ с; $T_2 = 0,57$ с. Требуется определить устойчивость замкнутой САР. По критерию Михайлова устойчивость замкнутой САР определяется по ее характеристическому уравнению $D(P)$, т. е. суммой числителя и знаменателя:

$$D(P) = P(1+T_1P)(1+T_2P) + k = T_1T_2P^3 + (T_1 + T_2)P^2 + P + k. \quad (2.40)$$

Заменяем оператор P на мнимую частоту $j\omega$, выделяем вещественную и мнимую части:

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \operatorname{Re} D(j\omega) = k - (T_1 + T_2)\omega^2 = 58 - 0,58\omega^2; \\ Y(\omega) &= \operatorname{Im} D(j\omega) = \omega - T_1T_2\omega^3 = \omega - 5,7 \cdot 10^{-3}\omega^3. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Подставив в выражение (2.41) значения частот в пределах $\omega = 0 \dots \infty$, составим табл. 2.2.

Таблица 2.2

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	5	10	13	15	∞
$X(\omega)$	58	44	0	-40	-70	$-\infty$
$Y(\omega)$	0	4	4,5	0	-5	$-\infty$

На рис. 2.22 показан годограф Михайлова, который последовательно в положительном направлении охватывает все три квадранта в координатах $Y(\omega) = f(X(\omega))$, что для системы III порядка соответствует ее устойчивости.

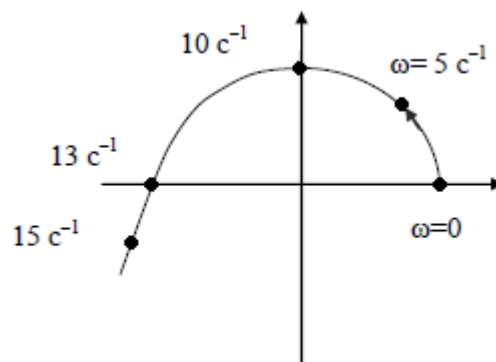


Рис. 2.22. Годограф Михайлова

Из приведенных двух примеров видно, что для одной и той же системы ее устойчивость определяется значениями коэффициента передачи и показателями инерционности.

Практически задаются определенным запасом устойчивости по фазе и модулю и, исходя из этого запаса, рассчитывают параметры проектируемой системы.

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Любая холодильная установка в процессе эксплуатации требует поддержания на заданном уровне значений различных параметров: температуры и давления нагнетания и всасывания компрессора, уровня масла в маслоотделителе или картере компрессоров, уровня жидкости в теплообменных аппаратах и т. д. Для решения поставленных задач существует регулирующая аппаратура, назначение которой заключается в том, чтобы текущее значение заданной регулируемой величины в конечном итоге оставалось на уровне, максимально близком к заданному значению. Чтобы выполнить эти условия, необходимо располагать измерительными средствами, которые будут фиксировать конечное значение регулируемой величины (температуры, давления, уровня и т. д.), а затем сравнивать полученное значение с заданным. Это позволит определить уровень и направление воздействия на конечное значение регулируемой величины.

Указанный тип измерительной аппаратуры встраивается в контур регулирования работы установки и не может быть отделен от него. Следовательно, такая аппаратура постоянно используется только для измерения конечного значения одной и той же регулируемой величины, например в холодильных установках – только температуры воздуха холодильной камеры. Однако существуют и другие средства, позволяющие измерять данный параметр в любом месте, т. е. переносные. Например, переносной термометр для измерения текущих значений температуры в системах кондиционирования воздуха, или анемометр, который размещают в приточных устройствах, подающих воздух, для определения его скорости в различных точках сечения.

Для решения перечисленных задач применяют технические средства автоматизации (ТСА), под которыми понимаются все устройства измерения, формирования, передачи, хранения, обработки и отображения информации, предназначенной для реализации управляющих и регулирующих воздействий на объект управления.

3.1. Классификация технических средств автоматизации

Технические средства автоматизации классифицируются по следующим признакам [6]: назначению в системе управления, виду используемой энергии.

3.1.1. Классификация по назначению в системе управления

Первичные преобразователи. К ним относятся приборы и устройства, предназначенные для первичного преобразования контролируемых на объекте управления параметров в сигнал, удобный для последующей обработки (термометры сопротивления, термопары, чувствительные элементы манометров, реле давления и др.).

Средства передачи сигнала – устройства, обеспечивающие передачу сигнала между отдельными ТСА и устройствами управления (сигнальные кабели, устройства телепередачи информации, пневмотрассы, проводная связь).

Средства обработки информации. К этой группе относится широкий класс приборов, которые обрабатывают поступающую информацию для последующей ее передачи на другие устройства автоматики (усилители, функциональные и цифровые преобразователи, интеграторы, дифференциаторы, устройства математической и логической обработки информации, элементы памяти).

Исполнительные устройства – элементы, которые реализуют управляющие воздействия, сформированные в блоках системы управления, непосредственно на объекте управления (исполнительные механизмы в виде электро- или пневмоприводов с регулирующими органами, вентилей, клапанов).

Средства взаимодействия оператора и ТСА – устройства, предназначенные для вывода информации оператору в визуальной, звуковой формах или в виде документа; для ввода информации и команд оператором (пульты оператора, задатчики, показывающие и самопишущие приборы, дисплеи, сигнальные табло, мнемосхемы работающего оборудования).

3.1.2. Классификация по виду используемой энергии

Приборы прямого действия, т. е. без подвода внешней энергии (термометры расширения, манометры, поплавковые регуляторы уровня и др.).

Приборы, для работы которых необходима электрическая энергия: большой мощности ($V \geq 220 \text{ В}$, $I \geq 0,5 \text{ А}$) для работы силовых устройств автоматики; средней мощности ($V = 6...48 \text{ В}$, $I = 0,2...0,5 \text{ А}$) для работы сигнальных устройств, реле, элементов

пульта управления; малой мощности ($V \leq 6$ В, $I \leq 10$ мА) для работы интегральных схем, элементов микроэлектроники).

Приборы, для работы которых требуется энергия сжатого воздуха: высокого давления ($P \geq 1,0$ МПа); среднего давления ($P = 0,7 \dots 1,0$ МПа); стандартного давления ($P = 0,14 \pm 10\%$ МПа) и низкого давления ($P \leq 2,0$ кПа) – для струйных элементов пневмоавтоматики.

Приборы, для работы которых необходим подвод жидкости под давлением (минеральное масло): высокого ($P = 1,0 \dots 4,0$ МПа) и среднего ($P = 0,3 \dots 1,0$ МПа) давления. К этой группе приборов относятся гидроцилиндры, золотниковые переключатели, исполнительные механизмы роботов, манипуляторов (например, для изменения холодопроизводительности компрессоров).

Все приборы автоматики по определенным признакам сведены в систему приборов, которая называется Государственной системой приборов – ГСП.

3.2. Государственная система приборов

Для осуществления унификации номенклатуры выпускаемых приборов и внедрения в промышленность серийно выпускаемых образцов разработана единая для всех отраслей Государственная система приборов – совокупность максимально унифицированных элементов, приборов, блоков и устройств со стандартными входными и выходными сигналами, нормализованными габаритами и едиными параметрами источника питания.

Государственная система приборов включает в себя следующие технические средства: технические средства формирования информации, устройства передачи информации, средства обработки и хранения информации, устройства непосредственного воздействия на объект управления.

На базе этих устройств реализуется все разнообразие схем систем автоматического управления и регулирования, контроля и сигнализации. В ГСП предусматривается полная согласованность информационных, энергетических и конструктивных связей между приборами, источниками питания, соединительными и крепежными элементами и частями.

Все выпускаемые приборы стандартизированы и унифицированы по пяти группам параметров: по виду и уровню входных

и выходных сигналов; по мощности источников энергии; по характеристикам потребляемых в процессе эксплуатации вспомогательных материалов (диаграммная бумага, магнитная лента); по присоединительным размерам для соединения приборов между собой и с источниками питания; по габаритным размерам приборов для облегчения их совместной компоновки, соединения в блоки, а также для монтажа на пультах и щитах.

В зависимости от вида энергии, поступающей от источника питания, различают три ветви ГСП: электрическую, пневматическую и гидравлическую. Кроме того, предусмотрена четвертая ветвь приборов и устройств – прямого действия, не имеющая специальных источников питания, а использующая энергию объекта контроля, управления и регулирования (например, манометры, щитовые амперметры и вольтметры, реле температуры).

По значению входных и выходных параметров сигналов приборов различают:

а) унифицированные сигналы постоянного тока (0–5 мА, 0–20 мА, 4–20 мА, 0–100 мА, $-5...0...+5$ мА, $-20...0...+20$ мА, 0...10 мВ, 0...100 мВ, 0...1 В, $-1...0...+1$ В, 0...10 В);

б) унифицированные сигналы переменного тока (0–1 В, 0–2 В, 0–10 В);

в) электрические дискретные сигналы (6; 12; 24; 48; 60 В);

г) электрические частотные сигналы (2–4 кГц, 4–8 кГц);

д) пневматические сигналы с давлением $P = 0,2...1$ бар ($2 \cdot 10^4...10^5$ кПа).

По имеющейся системе приборов создается возможность реализации на базе ТСА разнообразных схем систем автоматического управления и регулирования, контроля и сигнализации параметров объекта управления, к которому относится и холодильная установка. Достоинством разработанной системы приборов является возможность автоматического управления и регулирования любых параметров объекта управления без изменения элементной базы структуры регулятора или другого устройства. При переходе на регулирование других параметров объекта достаточно в регуляторе сделать замену только чувствительного элемента и вторичного преобразователя, который и сформирует в зависимости от преобразуемого параметра унифицированный сигнал в вышеуказанных диапазонах.

3.3. Метрологические характеристики измерительных приборов

Все приборы, используемые в производстве или научных исследованиях, должны проходить метрологическую проверку, сроки и порядок проведения которой определяются Госстандартом. По каждому прибору, используемому в системах контроля и автоматизации, определены предельные значения погрешности. Для большинства приборов значения погрешности наносятся на его шкалу в виде класса точности. Госстандартом утверждены восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Класс точности определяет основную приведенную погрешность прибора.

Различают следующие типы погрешностей:

а) абсолютную погрешность Δ – это алгебраическая разность показаний проверяемого прибора $X_{\text{п}}$ и действительного значения измеряемой величины $X_{\text{д}}$; причем за действительные значения принимаются значения, измеренные прибором высокого класса точности: $\Delta = |X_{\text{п}} - X_{\text{д}}|$;

б) относительную погрешность δ – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины в процентах: $\delta = \pm (\Delta / X_{\text{д}}) 100 \%$;

в) приведенную погрешность – это отношение абсолютной погрешности к разности верхнего и нижнего значений шкалы прибора X_N в процентах; она равна $(\Delta / X_N) 100 \%$. Эта погрешность характеризует класс точности прибора;

г) основную погрешность – это погрешность прибора при его работе в нормальных условиях, т. е. $t = (+20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; $\phi = (60 \pm 20) \%$; $P = (760 \pm 20) \text{ мм рт.ст.}$;

д) дополнительную погрешность – погрешность, обусловленную работой прибора в условиях, отличных от нормальных;

е) общую приведенную погрешность – это сумма основной и дополнительной приведенной погрешностей.

3.4. Приборы для преобразования и измерения температуры

Понятие параметра «температура» – это субъективное понятие, порожденное ощущением тепла и холода. С термодинамической точки зрения температуру характеризует степень нагрева тела за счет

движения молекул. Таким образом, эта физическая величина не может быть измерена прямым способом.

Первый термометр изготовил шведский ученый Цельсий в 1742 г. Его термометр имел две опорные точки: 0 – плавление льда и 100° – кипение воды, которые и положены в основу шкалы Цельсия. Лорд Кельвин, предполагая, что тепло вызывается движениями молекул, предложил новую шкалу, рассматривая температуру не только как градуированную величину, но и как измеряемую, хотя и очень сложным способом. Были приняты следующие опорные точки:

13,81 К или –259,34 °С – тройная точка водорода;

273,16 К или +0,01 °С – тройная точка воды;

373,15 К или 100 °С – точка кипения воды;

3695 К или 3422 °С – температура плавления вольфрама.

Кроме рассмотренных способов измерения температуры, применяется также шкала Фаренгейта, имеющая следующие соотношения относительно шкалы Цельсия (табл. 3.1).

Таблица 3.1

°C	0	5	10	15	20	25	30	35	40	60	80	100
°F	32	40	50	60	70	75	85	95	105	140	175	212

По принципу действия приборы измерения температуры бывают трех типов: термометры расширения, манометрические термометры и электрические приборы.

3.4.1. Термометры расширения

Принцип действия термометров расширения основан на законе Гей-Люссака, т. е. свойствах физических тел изменять свой объем или линейные размеры при изменении температуры:

$$A_2 = A_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где A_2 и A_1 – размеры нагреваемого тела при температуре T_1 и T_2 ; α – коэффициент температурного расширения.

Термометры расширения подразделяются на жидкостные, биметаллические и dilatометрические.

Жидкостные термометры (рис. 3.1) – работа данных термометров основана на различии коэффициентов объемного расширения

материала оболочки термометра и жидкости, заключенной в ней (ртуть, толуол, спирт).

Коэффициент объемного расширения определяется как

$$\beta_{T_1 T_2} = \frac{V_{T_1} - V_{T_2}}{V_0 (T_2 - T_1)},$$

где V_0 , V_{T_1} , V_{T_2} – объемы жидкости при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре T_1 и T_2 , соответственно.

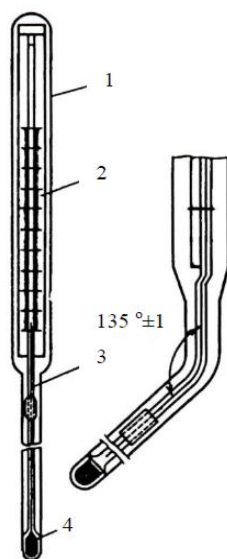


Рис. 3.1. Жидкостные термометры:

1 – наружная оболочка; 2 – пластинка с нанесенной на ней шкалой;
3 – тонкостенный капилляр; 4 – термобаллон с ртутью

Диапазоны измерения жидкостных термометров:

- спиртовой термометр $-100 \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- обычный ртутный термометр $-35 \dots +300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ртутный термометр из стекла с газовым заполнением $-35 \dots +500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ртутный термометр из кварцевого стекла $-35 \dots +800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Достоинство подобных элементов измерения температуры заключается в простоте конструкции и достаточной точности, однако эти приборы относятся к группе локального измерения температуры. Недостатки заключаются в хрупкости конструкции и в отсутствии дистанционной передачи сигнала.

Биметаллические термометры состоят из двух спрессованных путем холодного проката пластин с разными коэффициентами линей-

ного расширения (например, латунь и инвар); при изменении температуры изменяется кривизна пластин, степень которой определяется значением температуры. Устройство такого термометра показано на рис. 3.2.

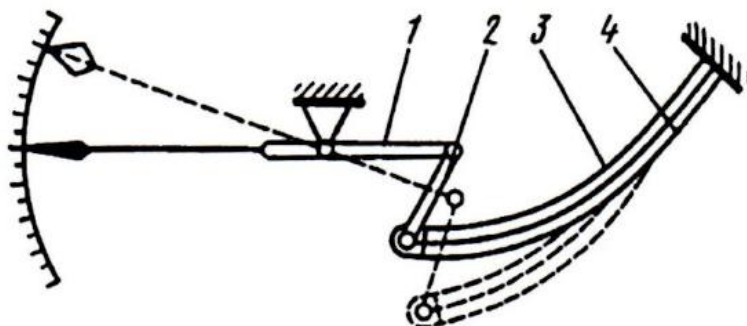


Рис. 3.2. Устройство биметаллического термометра:

1 – рычаг; 2 – тяга; 3 – полоска из материала с большим коэффициентом линейного расширения; 4 – полоска из материала с меньшим коэффициентом линейного расширения

Изменение температуры вызывает деформацию биметаллической ленты. Изменение длины ленты передается через самопишущее устройство. Как правило, этот принцип измерения температуры используется в самопишущих термометрах или термографах либо в качестве стабилизаторов температуры в водонагревателях, утюгах. Диапазон измерения температуры биметаллическими термометрами от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность составляет 1–1,5 %.

Дилатометрические термометры (рис. 3.3) – принцип работы стержневых (дилатометрических) термометров основан на разнице в коэффициентах расширения двух твердых тел.

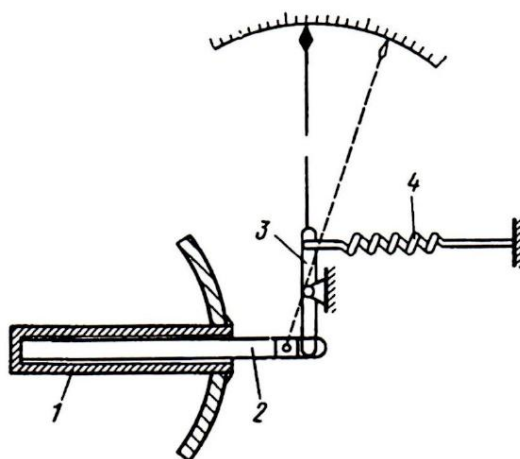


Рис. 3.3. Дилатометрический термометр:

1 – закрытая с одного конца трубка; 2 – стержень; 3 – рычаг; 4 – пружина

В случае стержневых (дилатометрических) термометров используется стержень с низким коэффициентом теплового расширения (инвар, фарфор), который вставляется в трубку из материала с высоким коэффициентом теплового расширения (латунь, нержавеющая сталь). Такие термометры используются в основном в качестве стабилизаторов температуры и применяются при температуре до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.2. Манометрические термометры

Работа этих приборов основана на законе Шарля, т. е. зависимости давления вещества от температуры $P_t = P_0(1 + \delta T)$ при постоянном объеме. В термобаллон закачивается легкокипящее вещество (жидкость, газ либо пар). В качестве наполнителя обычно используют эфир, хлористый этил, ртуть. Температурный диапазон: $-60 \dots +550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устройство манометрического термометра показано на рис. 3.3. Такой термометр обеспечивает высокую точность измерения ($\pm 1 \dots 2\%$) от диапазона измерения. Достоинством прибора является простота конструкции. Недостатки связаны с длиной капиллярной трубки, инерционностью системы, а также отсутствием дистанционного показания.

3.4.3. Электрические приборы

В их состав входят первичный преобразователь (датчик) и вторичный прибор. В качестве первичного преобразователя используют термометры сопротивления (медные или платиновые) либо термопары. Для термометров сопротивления характерно изменение их сопротивления при изменении температуры $R = f(T)$, причем в большом диапазоне температур эта зависимость нелинейная, но для малых диапазонов ее можно считать линейной (рис. 3.4):

$$R_t = R_0(1 + \delta T),$$

где δ – температурный коэффициент сопротивления; R_0 – значение сопротивления датчика при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, определяемое его градуировкой: ТСР (20–10 Ом, 21–46 Ом, 22–100 Ом), ТСМ (23–53 Ом, 24–100 Ом).

Коэффициент δ : $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ для ТСМ и $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ для ТСП. Диаметр провода для платины составляет 0,07 мм; для меди – 0,1 мм.

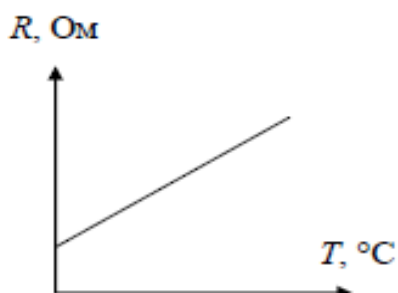


Рис. 3.4. Зависимость сопротивления от температуры

Термопреобразователи подключаются к измерительному прибору по двух- и трехпроводной схеме.

В первом случае (рис. 3.5) термопреобразователь подключается к измерительному прибору двумя проводниками, имеющими соответственно $R_{\pi 1}$ и $R_{\pi 2}$. Условия баланса мостовой схемы будет, когда $R_1 R_3 = R_2 R_t$. Так как $R_{\pi 1}$ и $R_{\pi 2}$ соединены последовательно с R_t , то

$$R_1 R_3 = R_2 (R_t + R_{\pi 1} + R_{\pi 2}),$$

где R_t – сопротивление термопреобразователя в точке измерения технологического параметра; $R_{\pi 1}$ и $R_{\pi 2}$ – погрешности измерения, так как сопротивление подводящих проводников зависит от температуры.

Для того чтобы ликвидировать влияние подводящих проводов, используют трехпроводную схему подключения (рис. 3.6).

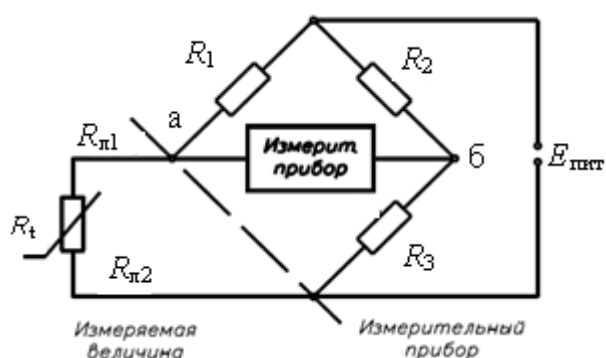


Рис. 3.5. Двухпроводная схема подключения термопреобразователя

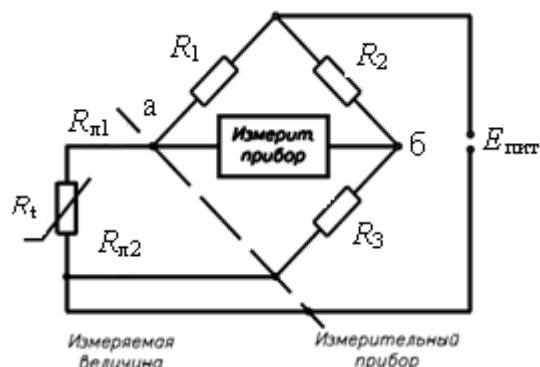


Рис. 3.6. Трехпроводная схема подключения термопреобразователя

Из условия баланса уравнение запишется в виде

$$R_1 (R_3 + R_{л2}) = R_2 (R_t + R_{л1}).$$

Сопротивление подводящих проводников находится в разных плечах моста и равенства, что приводит к компенсации влияния подводящих проводов.

3.4.4. Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Эти датчики предназначены для преобразования температуры в диапазоне $-50...+1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принцип действия термопар основан на явлении термоэлектрического эффекта. В месте соединения (спая) двух проводников из разных металлов и их сплавов возникает термоЭДС (термоэлектродвижущая сила – ТЭДС), величина которой зависит от температуры. Величина ТЭДС определяется материалом электродов термопары и разностью температур в местах спая (рис. 3.7). Спаянные концы термопар образуют рабочий спай (горячий) t_r , который погружается в среду, в которой измеряется температура. Вторые концы погружаются в среду со стабилизированной температурой, например в сосуд Дьюара со льдом (холодный спай). Результирующая ТЭДС

$$e(t_x, t_r) = e_r - e_x.$$

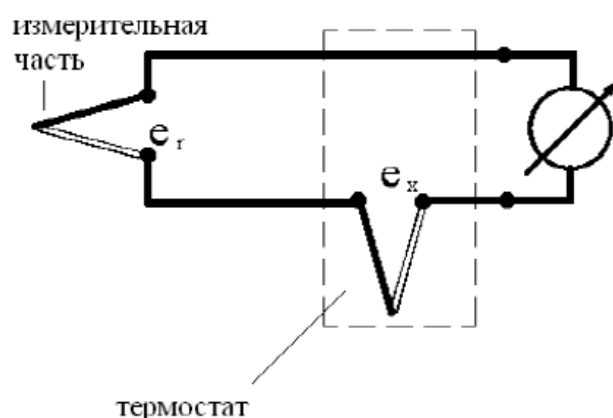


Рис. 3.7. Схема работы термопары

Для изготовления термопар применяются электроды в виде проволоки диаметром 0,5 мм из благородных металлов или 0,5–5 мм – из неблагородных. Достоинствами термопар являются: высокая степень точности, большой диапазон измерения температуры, отсутствие постороннего источника питания, малая инерционность.

Недостатки – плохая взаимозаменяемость из-за разброса характеристик отдельных образцов и необходимость стабилизации температуры холодных концов спая.

Выпускаются следующие промышленные термопары:

ТПП (платина–родий – платина–родий 10 %); диапазон измеряемых температур: $-20 \dots 1300$ °С; ТЭДС $e = 0,64$ мВ/100 °С;

ТПП (платина–родий – платина–родий 30 %) – $300 \dots 1600$ °С; $e = 0,64$ мВ/100 °С;

ТХА (хромель–алюмель) – $50 \dots 1000$ °С; $e = 4,1$ мВ/100 °С;

ТПП (хромель–копель) – $50 \dots 600$ °С; $e = 6,95$ мВ/100 °С.

Кроме того, часто используют нестандартные термопары медь–константан.

В измерительный комплект с термопарами стандартной градуировки в качестве вторичного прибора входят магнитоэлектрический милливольтметр либо электронные измерители-регуляторы температуры. Схема подключения термоэлектрического датчика (термопары) с компенсатором температуры свободных концов показана на рис. 3.8, что соответствует ее устойчивости.

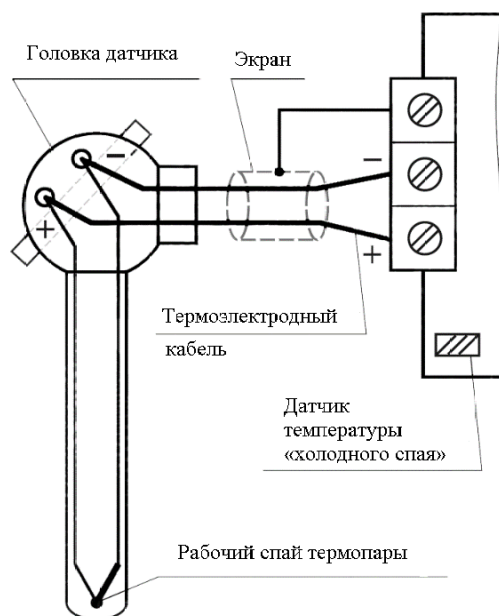


Рис. 3.8. Схема подключения термоэлектрического датчика (термопары) с компенсатором температуры свободных концов

3.4.5. Полупроводниковые датчики измерения температуры

Такие датчики называются термисторами. Материалом полупроводниковых термометров служат обычно германий, кремний или спекаемые оксиды металлов. Их сопротивление при повышении температуры уменьшается по экспоненте, причем это изменение сопротивления почти в 10 раз больше, чем у проволочных резисторов. Однако термисторы обладают недостатками – нелинейностью зависимости сопротивления от температуры и разбросом статических характеристик от образца к образцу, что исключает возможность их взаимозаменяемости.

На рис. 3.9 приведены сравнительные характеристики для платинового термометра сопротивления и кадмиевого термистора. Для снятия информации об изменении сопротивления рассмотренных датчиков температуры их включают в одно из тел моста Уинстона.

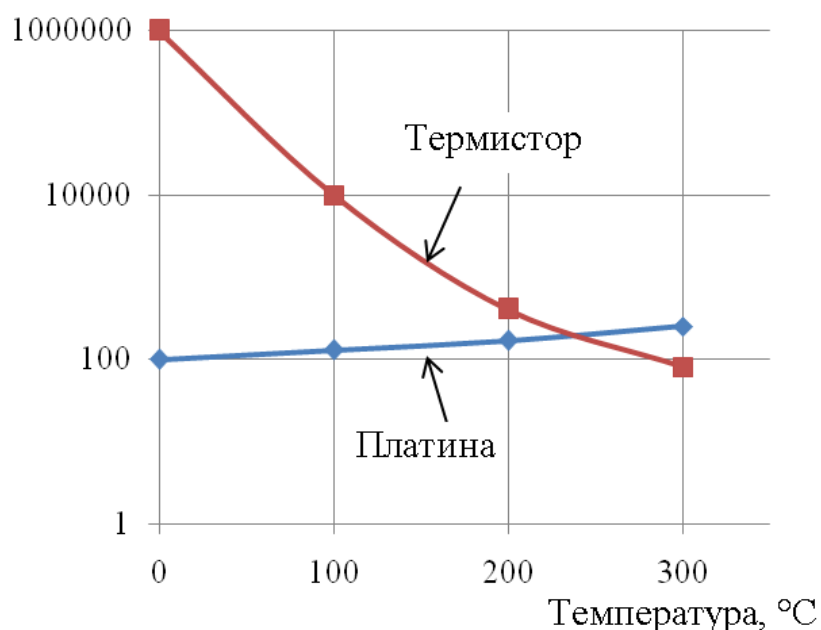


Рис. 3.9. Сравнительные характеристики для платинового термометра сопротивления и кадмиевого термистора

Достоинства этих датчиков:

- большая (высокая) стабильность характеристик;
- простота конструкции и надежность в работе.

Недостатки рассматриваемых датчиков:

- сложная схемная реализация снятия информации об изменении сопротивления;
- сравнительно небольшой линейный диапазон измерения температуры;
- саморазогрев датчика.

В качестве вторичного прибора термометра сопротивления применяют электронные измерители-регуляторы.

Зависимость сопротивления от температуры выразится так:

$$R_t = Ae^{B/\theta},$$

где R_t – значение сопротивления чувствительного элемента; A и B – коэффициенты, постоянные для данного экземпляра полупроводникового датчика; θ – абсолютная температура, К;

3.4.6. Подключение датчиков с унифицированным выходным сигналом тока или напряжения

Многие датчики различных физических величин оснащены нормирующими измерительными преобразователями. Нормирующие преобразователи преобразуют сигналы первичных датчиков (термопар, термопреобразователей сопротивления, манометров, дифманометров и др.) в унифицированный сигнал постоянного тока или напряжения с диапазонами: 0–20 мА, 4–20 мА, 0–5 мА или 0–1 В. Диапазон выходного тока нормирующего преобразователя пропорционален значению физической величины, измеряемой датчиком, и соответствует рабочему диапазону датчика, указанному в его технических характеристиках.

В ряде приборов фирмы «ОВЕН» имеется встроенный источник питания постоянного тока, изолированный от схемы прибора.

На рис. 3.10 показаны схемы подключения датчиков к прибору 2ТРМ1 с унифицированным выходным сигналом 4–20 мА по двухпроводной линии (верхний – со встроенным источником питания, нижний – с внешним питанием).

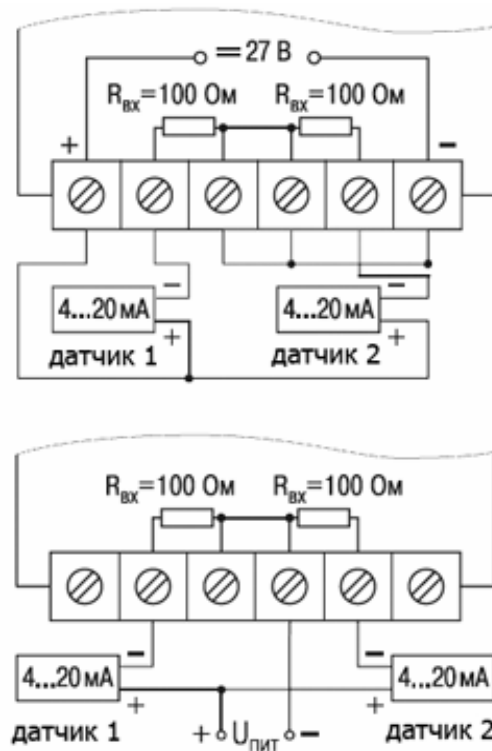


Рис. 3.10. Схемы подключения датчиков к прибору 2TRM1
с унифицированным выходным сигналом 4–20 мА
по двухпроводной линии

3.5. Приборы для измерения давления

Данные приборы широко применяются в холодильной технике для измерения давления: кипения и конденсации хладагента; всасывания и нагнетания хладагента компрессором холодильной установки; промежуточного; напора масляных, водяных и аммиачных насосов и т. д. Если давление больше барометрического давления воздуха, то оно называется избыточным:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{бар}},$$

где $P_{\text{абс}} = F/S$.

Давлением называется физическая величина, численно равная силе F , действующей на единицу площади поверхности S , расположенной нормально к этой силе. Если из емкости, разобщенной с атмосферой, откачать среду настолько, что давление в ней станет меньше атмосферного, то такое состояние среды называется ваку-

умом. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па), т. е. давление, которое соответствует действию силы в 1 Н на поверхность площади в 1 м². В технической системе единиц принимают давление, которое получается при действии силы в 1 кг на площадь в 1 см². Такая единица называется технической атмосферой и обозначается «ат»:

$$1 \text{ Па} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2.$$

Давление может измеряться и в барах, причем 1 бар = 10⁵ Па ≈ 1,0 кг/см². Приборы для измерения давления называются манометрическими.

3.5.1. Классификация манометрических приборов

Манометрические приборы классифицируются [7] по виду измеряемой величины, принципу действия, назначению и точности.

Классификация по виду измеряемой величины

Манометры – предназначены для измерения избыточного давления.

Вакуумметры – предназначены для измерения вакуума.

Мановакуумметры – могут измерять как избыточное давление, так и вакуум.

Тягомеры – измеряют малое давление (до 2·10³ Па).

Напоромеры – измеряют малый вакуум.

Тягонапоромеры – предназначены для измерения малого давления и малого вакуума.

Микроманометры – применяются, как и тягонапоромеры, для измерения малого давления и вакуума, а также для проверки тягонапоромеров.

Дифференциальные манометры – предназначены для измерения перепада давления.

Манометры абсолютного давления – предназначены для измерения абсолютного давления.

Барометры – предназначены для измерения атмосферного давления.

Классификация по принципу действия

Пружинные манометры: трубчатые, мембранные, сильфонные.

Жидкостные манометры: U-образные, чашечные, микроманометры, поплавковые, кольцевые, колокольные.

Грузовые манометры – обычно применяются для поверки пружинных манометров и представляют собой установку, совмещающую измерительную часть и устройство для создания давления.

Приборы для измерения давления или вакуума путем измерения электрофизических, магнитных и иных свойств некоторых материалов, функционально связанных с давлением: тензоманометры, пьезоманометры и др.

Классификация по назначению

Показывающие приборы.

Регистрирующие приборы.

Показывающие и регистрирующие приборы.

Показывающие или регистрирующие приборы с сигнализирующим либо регулирующим устройством.

Классификация по точности

Манометрические приборы подразделяются на восемь классов точности: 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,4. Приборы классов 0,16; 0,25 и 0,4 называются образцовыми и применяются для особо точных измерений и для поверки технических манометров. Классы 0,6 и 1,0 присваиваются приборам для точных измерений и контрольным приборам, служащим для поверки правильности показаний технических манометров. Манометрические приборы общетехнического назначения выпускаются классов 1,0; 1,5; 2,5 и 4,4.

3.5.2. Устройство и принцип действия основных типов манометрических приборов

Наибольшее применение в промышленности получили пружинные приборы для измерения давления и разрежения. В качестве чувствительных элементов в этих приборах применяют [7]:

– одновитковые трубчатые пружины (рис. 3.11, а);

- многовитковые пространственные трубчатые пружины, которые называются геликоидальными (см. рис. 3.11, б);
- плоские мембраны с различными типами гофра (см. рис. 3.11, в);
- гармониковые мембраны (сильфоны) (см. рис. 3.11, г).

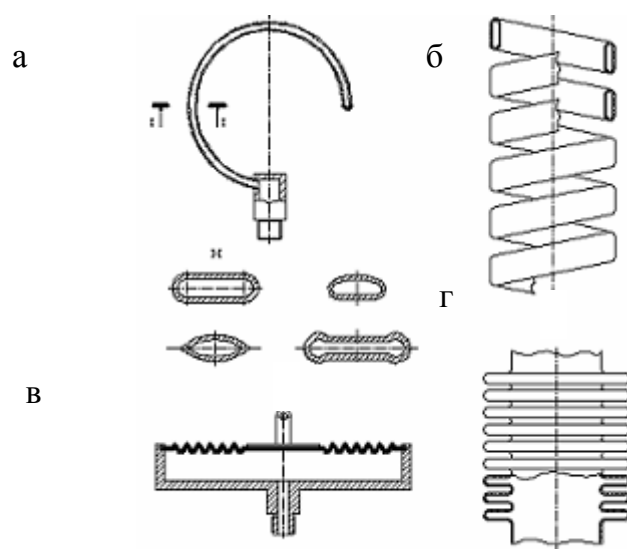


Рис. 3.11. Чувствительные элементы пружинных приборов для измерения давления и разрежения:

- а – одновитковые трубчатые пружины; б – геликоидальные пружины;
в – плоские мембраны; г – гармониковые мембраны

Чаще других типов упругих чувствительных элементов применяются одновитковые трубчатые пружины (трубки Бурдона), однако они обладают меньшей чувствительностью и точностью по сравнению с другими элементами.

Трубчатые пружины и сильфоны изготавливаются из латуни, легированной стали, бронзы или специальных сплавов. Мембраны изготавливаются либо из мягких материалов (резина, прорезиненная ткань), либо из жестких (сталь, латунь).

Недостатком упругих чувствительных элементов манометрических приборов является остаточная деформация упругих элементов (особенно у пружинных) после снятия давления. По этой причине в целях сохранения начальной точности измерения манометры с трубкой Бурдона рекомендуется использовать для измерения давления, максимальное значение которого не превышает трех четвертей максимального давления на их шкале, что практически исключает остаточную деформацию.

На рис. 3.12 показана принципиальная кинематическая схема манометра с трубкой Бурдона.

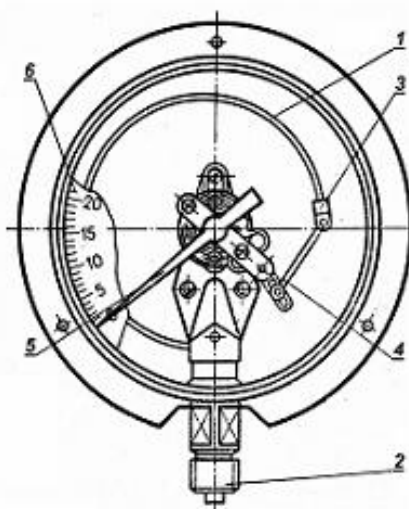


Рис. 3.12. Принципиальная кинематическая схема манометра с трубкой Бурдона:

1 – трубка Бурдона; 2 – крепление трубки к штуцеру манометра;
3 – управляющая тяга, которая крепит свободный конец трубки с сегментом зубчатого зацепления 4; 5, 6 – стрелка и шкала прибора

Под влиянием внутреннего давления в трубке, равного измеряемому, трубка деформируется (если давление избыточное, то трубка будет деформироваться в сторону большей площади, т. е. наружной поверхности трубки – против часовой стрелки) и перемещает через указанную на рис. 3.12 кинематическую связь стрелку прибора, которая показывает текущее значение давления.

В холодильных системах чаще всего применяют манометры типа ОБМГ, МТ, а для поверки приборов – манометры типа МКО класса 0,6 или образцовые манометры типа МО класса 0,4. Для измерения избыточного давления и вакуума применяют мановакуумметры типа МВП.

В холодильной технике манометры, как правило, имеют двойную шкалу – «давление–температура». Однако если шкала давления может быть использована для любых хладагентов, то температурная шкала будет давать правильные показания только для данного хладагента, тип которого указан на шкале манометра.

В современных холодильных системах измерение большинства параметров и управление ими осуществляются на расстоянии, что особенно характерно для установок с централизованным дистанционным управлением. В этом случае значение измеренного давления должно быть преобразовано в сигнал, который можно передавать на расстояние, для чего используют, как правило, электрические или пневматические преобразователи, преобразующие измеряемое давление в унифицированный сигнал ГСП; например, 0–5 мА, 0–20 мА или 4–20 мА. Примером такого преобразователя давления в унифицированный сигнал (0–5, 0–20, 4–20 мА) может быть преобразователь типа «Сапфир» либо «DANFOSS».

3.5.3. Измерительный преобразователь «Сапфир-22»

Измерительные преобразователи предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивают непрерывное преобразование значения измеряемого параметра (давления избыточного, абсолютного, гидростатического, разрежения, разности давлений) в унифицированный типовой сигнал дистанционной передачи.

Преобразователи разности давлений могут использоваться для преобразования значений уровня жидкости, расхода жидкости или газа. Преобразователи типа «Сапфир» работают со вторичными показывающими и регистрирующими приборами, регуляторами и другими устройствами автоматики, работающими от стандартного унифицированного сигнала 0–5 мА, 0–20 мА или 4–20 мА постоянного тока. Преобразователи в зависимости от диапазона измеряемого давления имеют несколько моделей. Каждый преобразователь имеет регулировку диапазона измерений и может быть настроен на любой верхний предел измерений, указанный на данной модели. Так, например, «Сапфир-22ДА» в зависимости от модели имеет верхний предел измеряемого давления от 2,5 кПа (модель 2020) до 16 МПа (модель 2061). Это преобразователи абсолютного давления. Измерительные преобразователи «Сапфир-22ДИ» преобразуют избыточное давление в диапазонах от 0,25 кПа (модель 2110) до 100 МПа (модель 2171). Преобразователи разрежения «Сапфир-22ДВ» преобразуют отрицательное давление в пределах от 0,25 кПа (модель 2220) до 1 МПа. Выпускаются также преобразователи давления разрежения типа «Сапфир-ДИВ», преобразователи разности давлений «Сап-

фир-22ДД» и преобразователи гидростатического давления «Сапфир-22ДГ». Все перечисленные преобразователи имеют классы точности 0,5 и 0,25.

Устройство преобразователей «Сапфир-22ДИ» и «Сапфир-22ДИВ» показано на рис. 3.13 [8] для моделей 2150, 2160, 2170 и 2350.

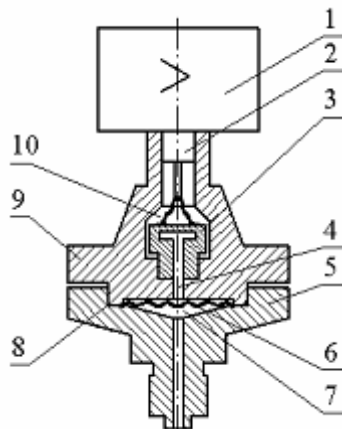


Рис. 3.13. Устройство преобразователей «Сапфир-22ДИ» и «Сапфир-22ДИВ»:
1 – электронное устройство; 2 – гермовывод; 3 – тензопреобразователь;
4 – внутренняя полость; 5 – фланец; 6 – мембрана; 7 – камера; 8 – прокладка;
9 – основание; 10 – полость

Преобразователь состоит из измерительного и электронного устройств. Преобразователи различных параметров имеют унифицированное электронное устройство и различаются лишь конструкцией измерительного блока. Измеряемый параметр подается в камеру измерительного блока и линейно преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сопротивления тензорезисторов тензопреобразователя, размещенного в измерительном блоке.

Электронное устройство преобразует изменение сопротивления тензорезистора в токовый сигнал.

Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, прочно соединенная с металлической мембраной тензопреобразователя.

На рис. 3.13 мембранный тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9. Внутренняя полость 4 тензопреобразователя заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой

среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9. Полость 10 сообщается с окружающей атмосферой. Измеряемое давление подается в камеру 7 фланца 5, который уплотнен прокладкой 8.

Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость воздействует на мембрану тензопреобразователя, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронное устройство 1 по проводам через гермовывод 2.

Такую конструкцию имеют преобразователи «Сапфир-22ДД» моделей 2410, 2420, 2430, 2434, 2440, 2444 (рис. 3.14) с пределами измерений от 0,25 кПа до 0,25 МПа.

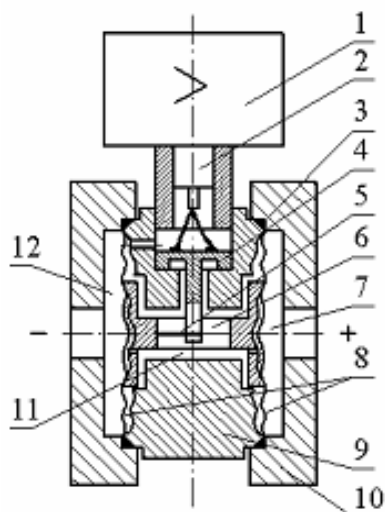


Рис. 3.14. Устройство преобразователя «Сапфир 22-ДД»:

- 1 – электронное устройство; 2 – гермовывод; 3 – прокладки;
4 – тензопреобразователь; 5 – тяга; 6 – центральный шток; 7, 12 – камеры;
8 – мембрана; 9 – основание; 10 – фланцы; 11 – замкнутая полость

Тензопреобразователь 4 мембранно-рычажного типа размещен внутри основания 9 в замкнутой полости 11, заполненной кремний-органической жидкостью, и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 8. Мембраны приварены по наружному контуру к основанию 9 и соединены между собой центральным штоком 6, который связан с концом рычага тензопреобразователя с помощью тяги 5. Фланцы 10 уплотнены прокладками 3. Воздействие измеряемой разности давлений (большее давление

подается в камеру 7, а меньшее – в камеру 12) вызывает прогиб мембраны 8, изгиб мембраны тензопреобразователя 4 и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронное устройство 1 по проводам через гермовывод 2.

Электрическое питание преобразователей всех моделей осуществляется от источника постоянного тока напряжением $(36 \pm 0,72)$ В. Потребляемая мощность от источника питания преобразователями, не более:

0,5 ВА – для преобразователя с выходным сигналом 0–5 мА;

1 ВА – для преобразователя с выходным сигналом 4–20 мА;

1,2 ВА – для преобразователя с выходным сигналом 0–20 мА.

При эксплуатации преобразователей в диапазоне отрицательных значений температуры необходимо исключить:

- накопление и замерзание конденсата в рабочих камерах и внутри соединительных трубок (при измерении параметров газообразных сред);

- замерзание, кристаллизацию среды или выкристаллизацию из нее отдельных компонентов (при измерении параметров жидких сред).

Преобразователи выдерживают воздействие температуры измеряемой среды у «открытой» мембраны в диапазоне от минус 50 °С до плюс 120 °С.

3.5.4. Сильфонные манометры

Чувствительным элементом сильфонных манометров является гофрированная трубка – сильфон, изготовленная из нержавеющей стали или латуни. Трубка зажата в плоской пружине или стальной пластине с возможностью деформации под действием давления, подаваемого внутрь трубки. Кинематическая схема сильфонного манометра показана на рис. 3.15 [4]. Он состоит из пластинчатой пружины 1, на которой закреплен крепежной скобой 3 сильфон 2; вилки 4, управляющей движением индикаторной стрелки (на рисунке не показано); винта 5 установки нуля прибора; трубки 6, соединяющей полость сильфона с емкостью, в которой измеряется избыточное давление P , за счет чего сильфон деформируется, но из-за плоской пружины 1 линейная деформация преобразуется в угловую.

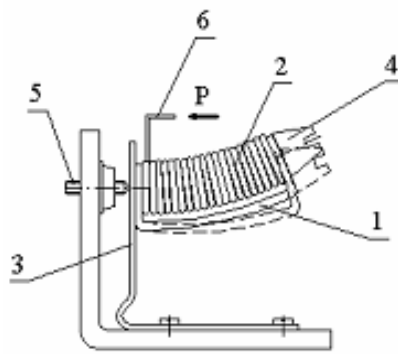


Рис. 3.15. Кинематическая схема сильфонного манометра:
 1 – пластинчатая пружина; 2 – сильфон; 3 – крепежная скоба;
 4 – вилка; 5 – винт установки нуля прибора; 6 – трубка

Схема преобразователя перепада давления показана на рис. 3.16. Манометры этого типа обладают высокой прочностью, стойкостью к воздействию ударов, вибраций и резких перепадов давления.

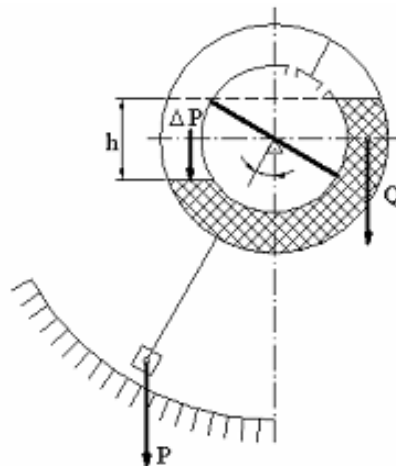


Рис. 3.16. Схема преобразователя перепада давления

3.5.5. Манометры с мембранной коробкой

Рассматриваемые манометры представляют собой приборы, чувствительный элемент которых выполнен в виде двух гофрированных мембран, скрепленных по краям путем сварки или пайки. Измеряемое давление подводится к внутренней полости мембранной коробки через трубку со штуцером. Перемещение жесткого центра мембран через кинематическую схему передается на стрелку прибора. Обычно эти приборы измеряют малое давление и разрежение.

3.5.6. Жидкостные приборы для измерения давления и перепада давления

Дифференциальные манометры U-образного типа

Эти приборы предназначены для измерения перепада давления между двумя точками объекта измерений, т. е. эти приборы должны иметь два входа. Если один из входов соединить с атмосферой, то дифференциальный манометр будет измерять избыточное давление.

Простейшим дифференциальным манометром является U-образная стеклянная трубка, наполненная водой, минеральным маслом или ртутью (рис. 3.17). U-образные дифманометры используются в обычном диапазоне температур для давления от 0,1 мбар до 2,5 бар при заполнении водой и от 1 мбар до 2,5 мбар при заполнении ртутью. Их точность составляет около 1 %.

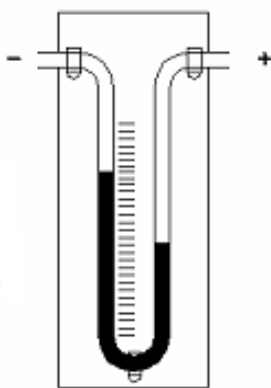


Рис. 3.17. U-образная стеклянная трубка

Для измерения малого давления (менее 1–2 мбар) с помощью U-образной трубки каждая ее ветвь наполняется жидкостью низкой плотности, плавающей поверх более плотной жидкости, например нефть поверх воды; на этом принципе основана работа двух-жидкостного манометра [4].

В случае еще более слабого давления (до тысячных долей миллибара) используют жидкостные микроманометры, имеющие, в отличие от U-образного дифманометра, одно наклонное колено (взамен вертикального). Наклон трубки увеличивает перемещение уровня жидкости при одном и том же давлении по сравнению с вертикальной трубкой, что повышает точность измерений. Некоторые микроманометры оборудованы специальным шарнирным

механизмом, позволяющим менять уклон трубки в широких пределах. Наиболее совершенные образцы микроманометров позволяют измерять давление порядка 10^{-6} мбар.

Кольцевые (или торовые) дифманометры

Такие дифманометры представляют собой полый тор (или кольцо) прямоугольного сечения, размещенный в вертикальной плоскости с возможностью вращения вокруг оси, перпендикулярной по отношению к этой плоскости (см. рис. 3.16) [7]. Тор до половины заполнен рабочей жидкостью (масло минеральное, вода). Внутренняя полость тора (или кольца) разделена непроницаемой перегородкой на два объема, которые соединены трубками с местом отбора измеряемого давления. В равновесном положении (давление в обеих частях полости одинаковое) уровень жидкости, которая частично заполняет полость тора, один и тот же с обеих сторон. Однако, если на одну из сторон жидкости будет действовать избыточное давление ΔP , равновесие нарушается и жидкость поднимается к другой стороне, порождая тем самым вращающий момент, приложенный к кольцу. В результате кольцо разворачивается вокруг оси, перпендикулярной плоскости размещения кольца, приводя к появлению приложенного к центру тяжести кольца противодействующего момента, обусловленного наличием противовеса. Поворот происходит до тех пор, пока оба момента не уравниваются. Измеряемая разность давлений при этом будет пропорциональна $\sin \alpha$, где α – угол отклонения тора от равновесного положения.

Точность кольцевых манометров составляет порядка 1 % от диапазона измерений. Область их использования лежит в диапазоне от 1,5–2 мбар для небольших значений давления и 0,2–0,3 бар – для повышенных перепадов давления.

Колокольные дифманометры

Принцип действия колокольных дифманометров основан на преобразовании измеряемого перепада давления в перемещение колокола, помещенного в рабочую жидкость.

Упрощенная схема работы прибора показана на рис. 3.18. Сосуд 1 заполнен рабочей жидкостью, в которую помещен колокол 2. При подводе давления через трубку 3 в полость колокола он будет

изменять свое положение пропорционально измеряемому давлению. Если сосуд открытый, то такой прибор будет измерять избыточное давление. Для измерения перепада давлений следует иметь замкнутую полость, в которую подводятся импульсные трубки от точек отбора давления над и под колоколом.

Примером такого дифманометра может служить прибор типа ДКО, который показан на рис. 3.19 [7]. В герметичном корпусе 1 расположен колокол 2, подвешенный на постоянно натянутой пружине 3. Нижняя часть колокола помещена в рабочую жидкость 4 (минеральное масло). Пространство над колоколом через соединительную трубку соединяется с местом отбора избыточного давления, а пространство под колоколом является камерой, сообщаемой с местом отбора меньшего давления. Измеряемое давление подводится по трубкам 5 и 6 к камерам в нижней части прибора, которые через трубки 7 и 8 сообщаются с пространством под колоколом (минусовая камера) и с пространством над камерой (плюсовая камера), соответственно.

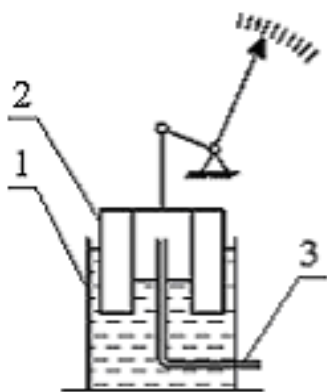


Рис. 3.18. Схема работы колокольного манометра:
1 – сосуд с рабочей жидкостью;
2 – колокол; 3 – трубка

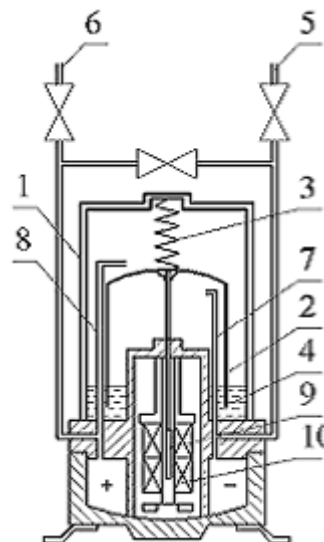


Рис. 3.19. Прибор типа ДКО:
1 – корпус; 2 – колокол; 3 – пружина;
4 – рабочая жидкость; 5–8 – трубки;
9 – сердечник; 10 – индукционная катушка

При изменении перепада давления вместе с колоколом перемещается вверх и вниз жестко связанный с ним сердечник 9 индукционной катушки 10. Этот узел является индуктивным датчиком перемещения и построен по дифференциально-трансформаторной схеме (рис. 3.20). Она включает в себя: первичную обмотку W_1 , запитанную от источника переменного тока U_{Π} (обычно сеть 220 В, 50 Гц); две вторичные обмотки W_1' и W_2'' с одинаковым числом витков обмоток ($W_1' = W_2''$), включенных встречно (поэтому и называется дифференциальной схемой), и подвижный сердечник внутри катушки, который перемещается вместе с колоколом. Индуктивная катушка закреплена на основании прибора. При равновесном состоянии ($\Delta P = 0$) колокол, а значит, и сердечник находятся в нижнем положении и на обмотках W_1' и W_2'' индуцируются равные по величине и противоположные по фазе ЭДС индукции $|e_1| = |e_2|$, в результате разностное напряжение на выходе вторичных обмоток $\Delta U = e_1 - e_2 = 0$. При наличии перепада давления ($\Delta P > 0$) колокол вместе с сердечником поднимается вверх, за счет чего для нижней катушки увеличивается магнитное сопротивление из-за увеличения воздушного зазора и ЭДС e_2 уменьшается, а разностное напряжение ΔU увеличивается.

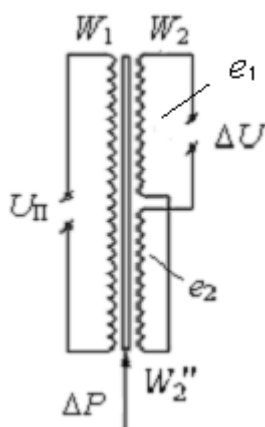


Рис. 3.20. Дифференциально-трансформаторная схема

Таким образом, рассмотренный прибор является бесшкальным; он формирует сигнал, пропорциональный перемещению колокола, который по линии связи сравнивается с сигналом индукционной катушки вторичного прибора, имеющей такую же схему.

Вторичный прибор уже является показывающим, его схема будет рассмотрена в разделе «Расходомеры».

Основная погрешность по шкале вторичного прибора составляет $\pm 2,5\%$ или $\pm 4\%$. Предел измерений составляет 400 Па для тягомеров и 200 Па для тягонапорометров.

Мембранные дифференциальные манометры типа ДМ

Такие манометры предназначены для непрерывного измерения перепада давления. Чувствительным элементом, воспринимающим перепад давления, является мембранный блок.

На рис. 3.21 показано устройство дифманометра типа ДМ с двумя сообщающимися между собой мембранными коробками, расположенными в двух отдельных мембранных камерах, заполненных дистиллированной водой. Аналогично колокольному манометру, давление подводится через трубки под мембранный блок с мембранной коробкой 1 (плюсовая камера) и в верхнюю камеру с мембранной коробкой 2 (минусовая камера).

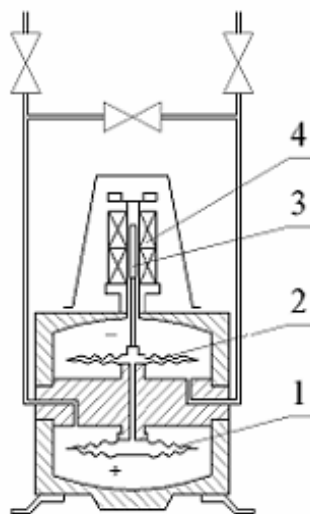


Рис. 3.21. Устройство дифманометра типа ДМ
с двумя сообщающимися между собой мембранными коробками:
1, 2 – мембранные коробки; 3 – сердечник; 4 – катушка

К мембранному блоку крепится сердечник 3 индукционной катушки 4. Под воздействием разности давлений мембранные коробки деформируются неодинаково, в результате чего перемещается сердечник индукционной катушки, формируя на ее выходе сигнал,

пропорциональный перемещению сердечника, т. е. перепаду давления ΔP . Обмотки индукционной катушки, как и у колокольного дифманометра, включены по дифференциально-трансформаторной схеме (см. рис. 3.20). Эти приборы бесшкальные и работают в комплекте с вторичным прибором, построенным также по дифференциально-трансформаторной схеме. Верхний предел измерений разности давлений составляет $1,57 \cdot 10^3 \dots 6,18 \cdot 10^5$ Па. Классы точности 1 и 1,5.

Монтаж манометров и дифманометров на трубопроводе должен производиться с соблюдением определенных правил: отверстие для штуцера отбора давления должно быть просверлено на гладкой поверхности вдали от местных гидравлических сопротивлений, следует также избегать изгибов трубопроводов. При проведении измерений с помощью жидкостных манометров необходимо следить за установкой их строго по уровню. Если в трубопроводе возможны пульсации давления, то рекомендуется между манометром и местом отбора давления ставить более удлиненную и изогнутую соединительную трубку в виде буквы «С». При измерении давления жидкостей, во избежание увеличения погрешности измерений за счет воздействия гидростатического столба жидкости, заполняющей соединительную линию, следует стремиться к тому, чтобы прибор и точки отбора давления находились в одной горизонтальной плоскости.

3.6. Датчики и приборы для измерения количества и расхода жидкостей и газов

Приборы для измерения количества и расхода жидкостей, пара и газа делятся на две основные группы:

- счетчики количества, предназначенные для измерения суммарного объема или веса вещества, протекающего по трубопроводам за некоторый промежуток времени;
- расходомеры, обеспечивающие измерение текущего значения расхода. Принято расход газа, воздуха или жидкости измерять в объемных единицах ($\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{м}^3/\text{мин}$, $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{л}/\text{ч}$, $\text{л}/\text{мин}$; $\text{л}/\text{с}$), а расход пара – в весовых единицах ($\text{кг}/\text{ч}$).

Счетчики количества в зависимости от способов измерения разделяются на объемные и скоростные. Расходомеры по принципу действия подразделяются:

- на расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры);
- расходомеры переменного перепада давления;
- электрические, тепловые, ультразвуковые.

3.6.1. Скоростные счетчики количества

Принцип действия основан на вращении крыльчатки, расположенной параллельно или перпендикулярно потоку вещества в трубопроводе. Вращение крыльчатки происходит за счет гидродинамического давления на крыльчатку со стороны потока [4]:

$$\Delta P = \alpha \gamma (\nu^2 \cdot 2g), \text{ Н/м}^2, \quad (3.1)$$

где α – коэффициент гидродинамического сопротивления, зависящий от геометрической формы и размеров тела в потоке; γ – удельный вес жидкости (газа), Н/м³; ν – скорость потока жидкости, м/с.

В крыльчаточных счетчиках (рис. 3.22) измерительный орган представляет собой крыльчатку 1 с плоскими лопатками, вставленную в цилиндрическую камеру 2. Ось крыльчатки перпендикулярна оси движущегося потока, который ударяет по лопаткам крыльчатки, за счет чего она вращается. В качестве счетчика числа оборотов в крыльчатке используются тахометр и суммирующее устройство 3, обеспечивающее фиксацию прошедшего через счетчик количества среды.

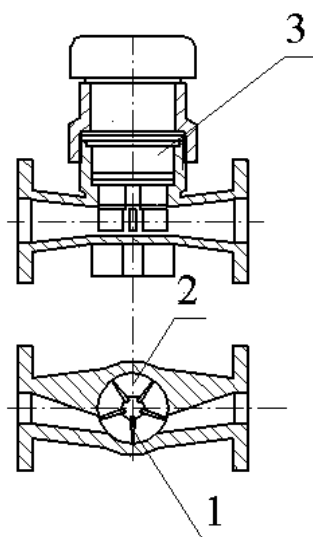


Рис. 3.22. Крыльчаточный счетчик:
1 – крыльчатка; 2 – цилиндрическая камера;
3 – суммирующее устройство

Турбинные счетчики расхода, называемые также осевыми счетчиками или счетчиками Вольтмана, имеют измерительный орган в виде ротора с винтообразными либо косыми плоскими лопастями, вращающегося в цилиндрической оболочке, или обечайке, с осью вращения, параллельной потоку среды. Если вращение ротора передается на счетное устройство механическим путем, то на оси ротора устанавливается шестеренчатая передача, обеспечивающая работу указателя расхода (числа оборотов ротора).

Существуют турбинные счетчики, в которых число оборотов ротора измеряется бесконтактным способом. В этом случае при каждом обороте ротора усилитель, в частотоподающую цепь которого включена индуктивная катушка, формирует электрический импульс на счетчик импульсов. По числу импульсов за определенное время можно судить о количестве протекающей среды за это время, что очень удобно при дистанционном измерении.

Выпускаются счетчики типа ВВ (горизонтальное расположение крыльчатки), ВК и ВКМ (вертикальное расположение крыльчатки). Счетчики устанавливаются на горизонтальных участках трубопроводов, причем до прибора должен быть прямой участок трубопровода для стабилизации потока длиной в 8–10 его диаметра, а за прибором – прямой участок длиной не менее 5 диаметров трубопровода. Стрелка на корпусе прибора должна совпадать с направлением потока.

3.6.2. Объемные счетчики количества

Работа этих приборов основана на преобразовании объемного расхода жидкостей или газообразной среды в угловую скорость рабочих элементов устройства. Обычно эти счетчики ставятся на воду, нефть, бензин, пар, газ и т. д. Измеряемое вещество, заполняя некоторый объем, приводит в движение поршень, овальные шестерни или другие элементы, соединенные со счетным устройством. Счетчик учитывает число заполнений определенного объема (рис. 3.23, 3.24).

Такие счетчики подразделяются на счетчики поршневые и счетчики с овальными шестернями. Схема работы счетчика с колеблющимся поршнем [4] приведена на рис. 3.23. Колеблющийся кольцевой поршень 1 установлен с эксцентриситетом по отношению к оси мерной камеры 2 и приводится в движение благодаря давлению проходящей через камеру среды. Через входной патрубок 3 измеряемая среда под давлением поступает в полость 2, перемещает пор-

шень 1 и через выходной патрубок 4 выталкивается к объекту потребления. Таким образом, за каждый оборот поршня через выходной патрубок 4 выталкивается вполне определенный объем жидкости, заключенный между профилем поршня и профилем внутренней поверхности корпуса прибора.

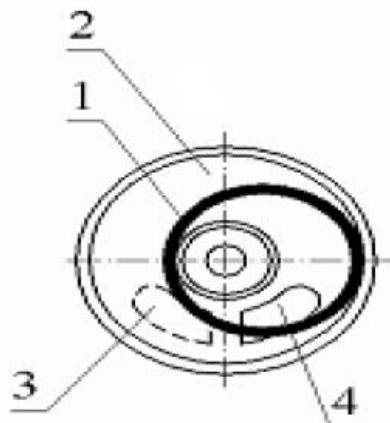


Рис. 3.23. Схема работы счетчика с колеблющимся поршнем:
1 – кольцевой поршень; 2 – мерная камера; 3 – входной патрубок;
4 – выходной патрубок

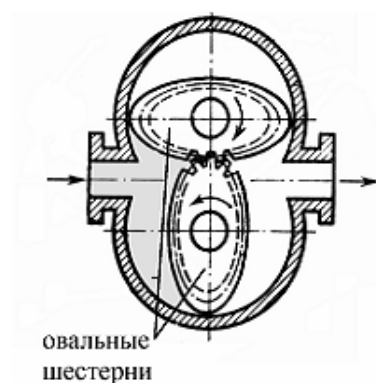


Рис. 3.24. Счетчики с овальными шестернями

Счетчики с овальными шестернями (см. рис. 3.24) отличаются от поршневых тем, что шестерни, вращающиеся за счет давления потока измеряемой среды, имеют овальную форму и между собой связаны зубчатой передачей. Действие счетчика основано на отсчете строго определенных объемов жидкости, отсекаемых в серпообразном пространстве между овальными шестернями и корпусом счетчика. Вращение овальных шестерен по кинематической схеме (на рисунке не показана) передается к стрелочному и роликовому счетным указателям через магнитную муфту сцепления и передаточный механизм.

Количество жидкости, прошедшей через счетчик, показывает как стрелочный, так и роликовый счётный указатель. Один полный оборот указательной стрелки соответствует 0,1 оборота крайнего цифрового ролика.

Как всякий измерительный прибор, объемные счетчики калибруются и обеспечивают достаточно высокую точность. Они могут использоваться для измерения как малых расходов (например, расхода жидкого топлива в генераторе абсорбционной холодильной ма-

шины), так и больших расходов, например до $6 \cdot 10^4$ м³/ч при подаче газа в генератор абсорбционной холодильной машины.

3.6.3. Расходомеры переменного перепада давления

Указанные приборы предназначены для измерения мгновенного значения расхода жидкости, газа или пара. Принцип действия основан на преобразовании параметра расхода в перепад давления на суженном участке трубопровода, т. е. в него монтируется сужающее устройство в виде сопла или диафрагмы (рис. 3.25).

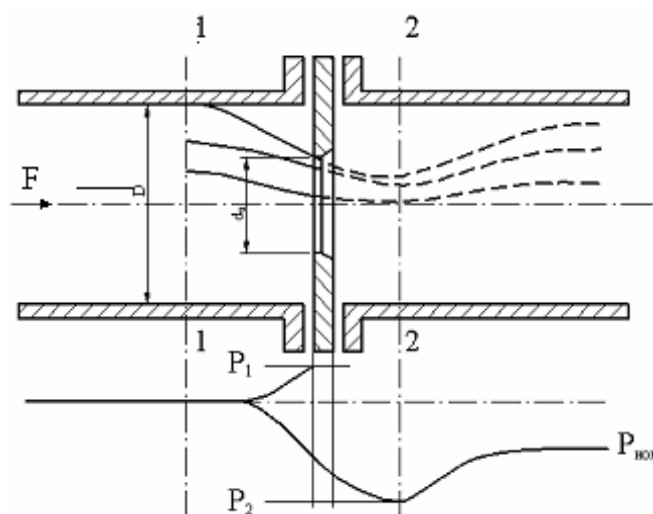


Рис. 3.25. Схема работы расходомера переменного перепада давления

Зависимость $F(\Delta P)$ имеет вид

$$F = \alpha S \sqrt{2\gamma g \Delta P},$$

где F – расход среды, кг/с; S – площадь сужающего устройства, м²; γ – удельный вес вещества, Н/м³; α – коэффициент расхода, зависящий от геометрической формы сужающего устройства; ΔP – перепад давления на суженном участке, Н/м².

Квадратичная зависимость $\Delta P(F)$ приводит к усложнению измерения, так как резко возрастает погрешность измерений с уменьшением расхода ниже 30 % от предела шкалы. Так, при расходе в 25 % $F_{\max}$ погрешность увеличивается в 16 раз относительно $F_{\max}$. Поэтому

диапазон измерения ограничивается 30 или 40–100 %. Шкала прибора получается нелинейной, в результате чего снижается точность отсчета. Для равномерности шкалы прибора применяют конструктивные меры, например применяют во вторичном приборе лекало специального профиля в передаточном механизме, связанного со стрелкой прибора. Кроме того, этот метод измерения пригоден при больших расходах в трубопроводах диаметром не менее 50 мм.

В трубопроводе до и после сужающего устройства через специальные камеры вводят импульсные трубки дифманометра, который преобразует перепад давления в электрический сигнал по дифференциально-трансформаторной схеме (см. рис. 3.20). Сигнал от дифманометра поступает на вторичный прибор (рис. 3.26) со шкалой, отградуированной в относительных величинах (процентах). Измерительная часть прибора также построена по дифференциально-трансформаторной схеме. Эта схема состоит из двух последовательно включенных трансформаторных катушек с ферромагнитным сердечником. Одна катушка находится на дифманометре, а вторая – на входе вторичного прибора. Вторичные обмотки катушек включены встречно, т. е. по дифференциальной схеме.



Рис. 3.26. Вторичный прибор

При рассогласовании положения сердечников катушек на выходе их обмоток формируется сигнал рассогласования $\Delta U = |e_1 - e_2| - |e_3 - e_4|$, где $e_{1,2,3,4}$ – ЭДС, индуцируемая во вторичных обмотках катушек. Сигнал ΔU усиливается электронным усилителем (ЭУ), выход которого нагружен на обмотку управления (ОУ) асинхронного двигателя (АД). Его вал через редуктор и лекальное устройство (ЛУ) во вторичном приборе изменяет положение сердечника до тех пор, пока не исчезнет сигнал рассогласования ΔU и стрелка прибора покажет относительное значение расхода вещества. Для перехода к абсолютным величинам вторичный прибор необходимо отградуировать, например объемным методом. Обычно при этом методе измерения применяют измерительный комплекс, в который входят сужающее устройство, рассчитанное по правилам 2864, дифманометр типа ДМ и вторичный прибор типа КСДЗ-С, показывающий и записывающий текущее значение расхода и имеющий приставку – счетчик расхода.

3.6.4. Расходомеры постоянного перепада давления

Принцип действия расходомеров основан на преобразовании расходов измеряемой среды в линейное перемещение конического поплавка (рис. 3.27, а) либо поршня (см. рис. 3.27, б) в вертикально расположенной трубке.

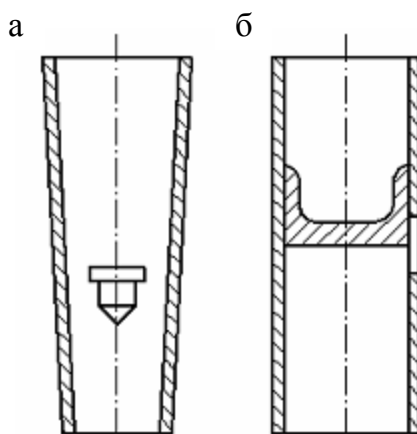


Рис. 3.27. Принцип действия поплавковых (а) и поршневых (б) расходомеров

Поплавковые расходомеры представляют собой трубку в виде усеченного конуса, диаметр которого увеличивается с высотой.

Внутри трубки находится поплавок, чей диаметр чуть меньше диаметра нижнего основания трубки. При определенной величине расхода поплавок устанавливается в таком положении вдоль трубки, для которого масса поплавка уравнивается силой давления, обусловленной перепадом давления, вызванным прохождением среды через кольцевой зазор между стенками трубки и корпусом поплавка и выталкивающей силой Архимеда, если речь идет о жидкости. Такие расходомеры называются ротаметрами и могут использоваться как для жидкостей, так и для газов или паров, но в каждом случае требуют калибровки.

Величину расхода для поплавковых расходомеров определяют по выражению

$$F = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2g V_{\text{п}} (\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{ср}}) \gamma_{\text{ср}}}{f}}, \text{ кг/с}, \quad (3.2)$$

где α – коэффициент расхода, зависящий от геометрической формы поплавка и физических свойств измеряемой среды; S_0 – сечение кольцевого зазора, определяемое положением поплавка в трубке, м^2 ; f – площадь лобовой поверхности поплавка относительно измеряемого потока среды, м^2 ; $V_{\text{п}}$ – объем поплавка, м^3 ; $\gamma_{\text{п}}$ и $\gamma_{\text{ср}}$ – удельный вес поплавка и измеряемой среды, соответственно, кг/м^3 .

Наиболее распространены приборы со шкалой расхода на стеклянной конической трубке – ротаметры типа РС-5, но такие простейшие приборы, как правило, используются в лабораторных условиях. При промышленных измерениях, в частности в холодильных системах, обеспечивается дистанционная передача положения поплавка посредством дифференциально-трансформаторной схемы на вторичный прибор типа КСДЗ-С, работа и принцип действия которого были рассмотрены (см. рис. 3.26).

У поршневых расходомеров в качестве чувствительного элемента используется поршень, перемещающийся внутри цилиндрической трубки; с изменением расхода изменяется сечение окна в трубке, через которое проходит поток измеряемой среды. Положение поршня в трубке также можно дистанционно передать по дифференциально-трансформаторной схеме на вторичный прибор, например типа КСДЗ-С.

3.6.5. Электромагнитные расходомеры

Такие расходомеры еще называют индукционными. Принцип работы этого типа расходомеров основан на законе электромагнитной индукции (законе Фарадея). На рис. 3.28 [4] показана схема индукционного датчика расхода.

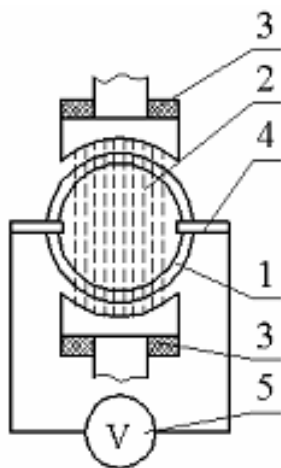


Рис. 3.28. Электромагнитный расходомер:
1 – трубопровод; 2 – магнитные силовые линии;
3 – катушки индуктивности; 4 – электроды; 5 – вольтметр

Если электропроводная среда, протекающая по немагнитному отрезку трубопровода 1, пересекает магнитные силовые линии 2, проходящие перпендикулярно направлению потока, то в ней наводится электродвижущая сила E , пропорциональная расходу:

$$E = V d B \cdot 10^{-5}, \text{ мВ},$$

где V – скорость движения потока измеряемой среды, см/с;
 d – внутренний диаметр трубопровода, см; B – магнитная индукция, Гс.

Магнитное поле создается либо катушками индуктивности 3, либо постоянным магнитом. ЭДС индукции снимается с диаметрально расположенных электродов 4 и перпендикулярных относительно магнитных силовых линий. Измеряемая среда должна иметь электропроводность не менее 10^{-3} Ом/м, т. е. омическое сопротивление не более 1 кОм/м.

В качестве вторичного прибора можно использовать прибор, измеряющий малые значения ЭДС индукции. Промышленностью выпускаются и специальные приставки для измерения расхода, например расходомер типа ИР-51.

Индукционные расходомеры имеют много достоинств. У них отсутствуют элементы, выступающие внутрь трубы, в связи с чем нет дополнительной потери давления. Показания вторичного прибора не зависят от вязкости и плотности протекающей среды. Они обладают высоким быстродействием и могут служить как для измерения малого ($100 \text{ см}^3/\text{ч}$), так и большого ($10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$) расхода жидкости. С помощью этих приборов возможны измерения расхода вязких и абразивных сред.

К недостаткам индукционных расходомеров следует отнести невозможность измерения расхода сред с малой электропроводностью, а также зависимость их показаний от электрохимических процессов при постоянном магнитном поле и помех от наводок при переменном магнитном поле.

3.6.6. Ультразвуковой расходомер

По принципу работы расходомеры относятся к время-импульсным ультразвуковым расходомерам, работа которых основана на измерении разности времени прохождения зондирующих импульсов, ультразвуковых колебаний (УЗК) по направлению движения потока жидкости в трубопроводе и против него. Возбуждение зондирующих импульсов производится электроакустическими преобразователями, устанавливаемыми на трубопроводе с измеряемым расходом.

По способу организации зондирования потока жидкости ультразвуковыми импульсами расходомер относится к автоциркуляционным расходомерам с попеременной коммутацией. Особенностью этих ультразвуковых расходомеров (УЗР) является попеременное функционирование двух синхроколец. Синхрокольца образуются приемопередающим трактом, охвачены запаздывающей обратной связью через электроакустический тракт – ПЭА1 → стенка трубопровода → жидкость → стенка трубопровода → ПЭА2, при этом расход определяется по зависимости

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V K_r, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где Q – максимальное значение эксплуатационного расхода;
 $K_r = v_{\text{ср}}/v$ – гидродинамический коэффициент.

Функциональная схема измерения расхода (УЗР) показана на рис. 3.29.

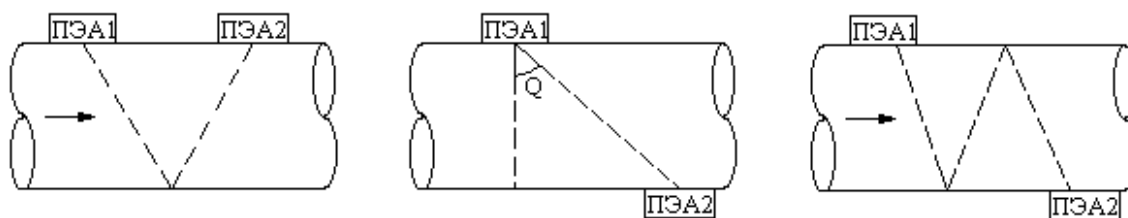


Рис. 3.29. Функциональная схема измерения расхода (УЗР)

3.7. Приборы для измерения уровня жидкости в сосудах

В технологической схеме холодильной установки имеются накопительные и промежуточные емкости, в которых необходимо постоянно контролировать уровень жидкости. Защита их от переполнения и поддержание уровня жидкости в заданных пределах осуществляются сигнализаторами и регуляторами уровня.

В зависимости от назначения уровнемеры подразделяются на указатели текущего значения уровня, т. е. обеспечивают непрерывное измерение, и сигнализаторы уровня, предназначенные для дискретных измерений в одном или нескольких положениях уровня [9].

В зависимости от метода, положенного в основу измерений, уровнемеры подразделяются на *механические* и *электрические*.

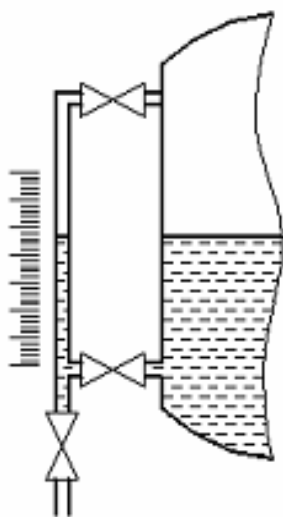


Рис. 3.30. Указательное стекло на стенке сосуда

Из механических уровнемеров в холодильных системах в основном применяются указательные стекла, которые монтируются непосредственно на стенке сосуда (рис. 3.30); предназначены для визуального наблюдения за уровнем жидкости в сосуде, их работа основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательные стекла для сосудов с избыточным давлением соединяются с сосудом обеими концами – верхним и нижним, а для открытых сосудов – только нижним.

Наблюдая за уровнем жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде. Указательные стекла снабжаются запорными устройствами для отклю-

чения их от сосуда для продувки системы. В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводятся предохранительные устройства с автоматически закрывающимся каналом при случайном повреждении стекла.

Достоинствами такого контроля являются простота и дешевизна конструкции. К недостаткам следует отнести невозможность обеспечить дистанционную передачу показаний и недостаточную прочность конструкции.

В работу электрических уровнемеров заложен принцип изменения параметров электрической цепи измерительной схемы прибора при изменении уровня жидкости в сосуде, а именно: сопротивления электрической цепи (кондуктометрические сигнализаторы, уровнемеры); электрической ёмкости (ёмкостные сигнализаторы уровня, уровнемеры) и индуктивного сопротивления (поплавковые сигнализаторы и регуляторы уровня).

3.7.1. Кондуктометрические сигнализаторы уровня

Принцип действия этих приборов основан на изменении электрического сопротивления между электродами при изменении уровня жидкости в резервуаре, в котором установлены электроды. Эти приборы в основном используются для сигнализации о том, что уровень жидкости не больше или не меньше определенного значения. Как правило, по высоте сосуда монтируются три электрода, представляющие собой металлические стержни, изолированные от корпуса сосуда. На рис. 3.31 показан фрагмент упрощенной схемы одного канала сигнализации трехканального сигнализатора уровня типа САУ-М6, который является аналогом сигнализаторов ESP50 и РОС301.

В сосуд врезаны три электрода 1, 2, 3 на разных уровнях по высоте. Жидкость, уровень которой сигнализируется дискретно в трех положениях, должна быть обязательно электропроводной с проводимостью не менее $2 \cdot 10^{-3}$ Ом/м. При касании жидкостью датчика (электрода) 1 на входе усилителя в точке А изменяется потенциал за счет сформировавшегося делителя напряжения R_1 , $R_{ж}$, запитанного от источника питания $U_{п}$. За $R_{ж}$ здесь условно обозначено сопротивление жидкостного промежутка между электродом 1 и стенкой сосуда.

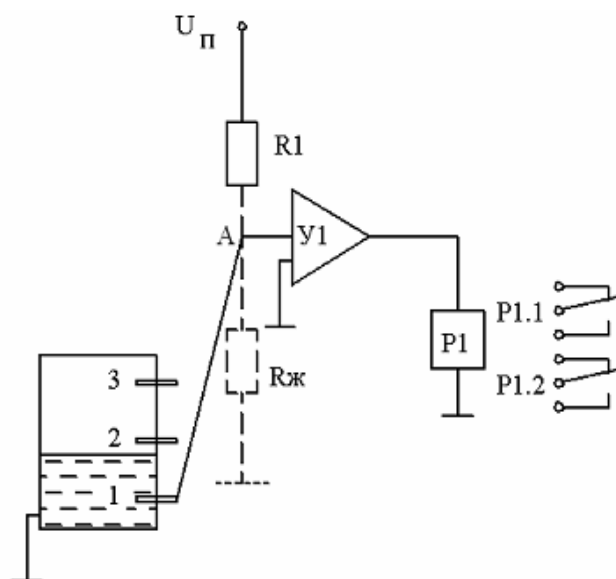


Рис. 3.31. Фрагмент упрощенной схемы одного канала сигнализации трехканального сигнализатора уровня типа САУ-М6

Усилитель U_1 работает в ключевом режиме, т. е. при определенном значении потенциала на его входе усилитель формирует сигнал на выходе, достаточный для срабатывания электрического реле P_1 , которое своими контактами $P_{1.1}$, $P_{1.2}$ обеспечивает коммутацию цепи сигнализации о значении уровня не ниже датчика 1 (обычно загорается лампочка) и цепи управления исполнительным механизмом подачи жидкости в сосуд. На схеме эти цепи не показаны. Остальные два

канала имеют структуры схемы, аналогичные рассмотренной. Если корпус резервуара неэлектропроводный, например из полимерного материала, то вводят искусственно дополнительный электрод, расположенный вертикально по всей высоте емкости, либо на стенку резервуара напыляют тонкий слой металла. В реальной схеме сопротивление R_1 может изменяться дискретно специальным переключателем в зависимости от проводимости жидкости.

Питание схемы осуществляется от встроенного блока питания, включающего в себя понижающий трансформатор и выпрямитель. Напряжение на электродах датчика составляет не более 10 В постоянного тока, точность срабатывания ± 5 мм.

3.7.2. Емкостной сигнализатор уровня

Сигнализатор уровня применяется для сигнализации дискретного значения уровня жидкостей и сыпучих сред. Принцип действия сигнализатора основан на изменении электрической емкости измерительной цепи при касании жидкостью или другой средой датчика-электрода, представляющего собой металлический электрод, заключенный в чехол из полимерного материала и через специальный кабель подключенный к входу измерительной схемы электронного блока.

На рис. 3.32 показана упрощенная схема сигнализатора уровня применительно к сигнализатору типа САУ-М7Е (электронный сигнализатор уровня).

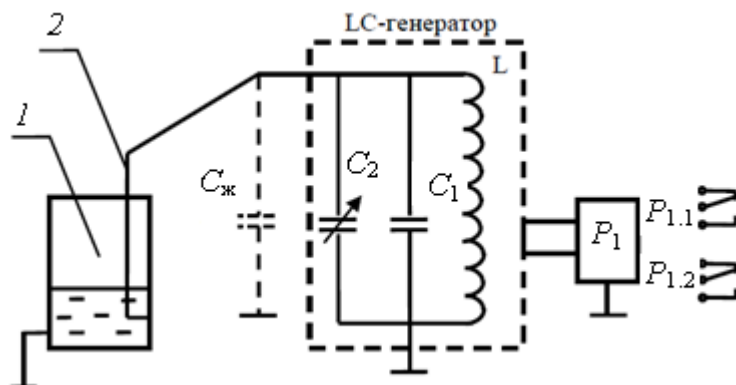


Рис. 3.32. Упрощенная схема сигнализатора уровня:
1 – резервуар; 2 – электрод

В резервуар 1 опущен на требуемую отметку датчик-электрод 2. Электронный блок представляет собой LC -генератор, к контуру частотозадающей цепи L, C_1, C_2 которого подключен выход датчика 2. LC -контур настроен на определенную высокую частоту, и реле P_1 на выходе генератора не срабатывает. При касании жидкостью датчика резко изменяется электрическая емкость $C_{ж}$, образованная жидкостным промежутком электрод–корпус сосуда, что приводит к срыву частоты генератора; через обмотку реле P_1 протекает постоянный ток, и оно срабатывает, коммутируя контактами $P_{1.1}, P_{1.2}$ цепи сигнализации.

Первоначально генератор настраивается на заданную частоту подстроечным конденсатором C_2 таким образом, чтобы срыв частоты колебаний происходил при соприкосновении датчика со средой.

При контроле уровня в двух и более положениях устанавливают сигнализатор на каждый уровень либо сигнализатор с двумя электродами, каждый из которых подключен к своей преобразовательной схеме (типа ЭСУ-2м).

Для емкостных сигнализаторов выпускаются следующие типы датчиков:

- стержневой с неизолированным электродом диаметром 6 мм из стали для неэлектропроводных жидкостей и сыпучих сред с величиной зерна до 5 мм;

– стержневой, изолированный фторопластом для электропроводных агрессивных жидкостей;

– пластинчатый, не изолированный для неэлектропроводных жидкостей и сыпучих сред с постоянной влажностью.

Питание сигнализатора осуществляется от сети переменного тока промышленной частоты напряжением 220 В. Погрешность срабатывания составляет $\pm 2,5$ мм.

3.7.3. Емкостной индикатор уровня

Индикатор уровня предназначен для непрерывного измерения уровня электропроводных и неэлектропроводных жидкостей в резервуаре. В качестве первичного преобразователя применяются стержневые, пластинчатые, кабельные емкостные преобразователи. При измерении электропроводных сред электроды преобразователя имеют фторопластовое покрытие.

На рис 3.33 показана структурная схема индикатора уровня типа ЭИУ-2 (электронный индикатор уровня).

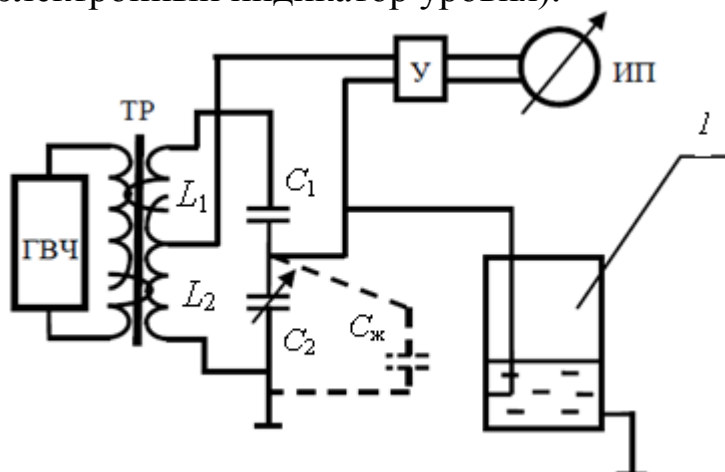


Рис. 3.33. Структурная схема индикатора уровня типа ЭИУ-2

В сосуд, в котором измеряется уровень жидкости, опущен датчик-электрод 1. Электронный блок включает в себя генератор высокой частоты ГВЧ с частотой генерации 100 кГц. К выходу генератора подключен трансформатор ТР, вторичная обмотка которого имеет среднюю точку, и совместно с конденсаторами C_1 , C_2 образует измерительную схему в виде индуктивно-емкостного моста с плечами L_1 , L_2 , C_1 и C_2 . Первичный емкостной преобразователь

(датчик) включен в одно из плеч моста параллельно подстроечному конденсатору C_2 .

По мере изменения уровня изменяется емкость $\Delta C_{\text{ж}}$ жидкостного промежутка датчик–корпус сосуда (для неэлектропроводной жидкости):

$$\Delta C_{\text{ж}} = EB\Delta h/4d,$$

где E – диэлектрическая проницаемость жидкости, пф/см; B – ширина или диаметр электрода, см; Δh – изменение уровня жидкости, см; d – расстояние между электродом и стенкой сосуда.

На измерительной диагонали моста формируется сигнал разбаланса, пропорциональный значению уровня жидкости, и усиливается усилителем $У$. Выходное напряжение усилителя составляет 0–100 мВ, что соответствует 0–100 % нижнего и верхнего значений уровней.

В качестве измерительного индикаторного прибора (ИП) может быть использован миллиамперметр М325, включенный в разрыв цепи выходного каскада усилителя, либо самопишущий показывающий прибор в виде автоматического потенциометра типа КСП любой модификации, подключенный к выходу усилителя.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Диапазон измерения уровнемера зависит от типа преобразователя, его длины, свойств жидкости. Пластинчатые емкостные преобразователи изготавливаются длиной 1–2,5 м, а стержневые и кабельные – длиной 1–2,5 и 4–10 м.

Подстроечный конденсатор C_2 представляет собою группу конденсаторов (обычно три), дискретно переключаемых в зависимости от номинальной емкости первичного преобразователя. Для исключения дополнительной погрешности, обусловленной наведением ЭДС в линии связи между датчиком и прибором, провода линии связи экранируются, а экран заземляется. Основная погрешность прибора составляет 2,5 % диапазона измерений.

3.7.4. Реле уровня полупроводниковые ПРУ-5

Реле уровня ПРУ-5 относится к индуктивным поплавковым сигнализаторам и регуляторам уровня и предназначено для контроля

верхнего и нижнего уровней жидкого аммиака, хладонов, воды, масла и других жидкостей плотностью не менее 580 кг/м^3 .

Принцип действия прибора основан на изменении индуктивности катушек, внутри которых расположен полый шарик из ферромагнитного материала. Конструкция из двух последовательно соединенных катушек 1 с шариком 2 внутри образует поплавковую камеру, которая врезается через уравнильные линии 3 в стенку резервуара 4 с жидкостью (рис. 3.34).

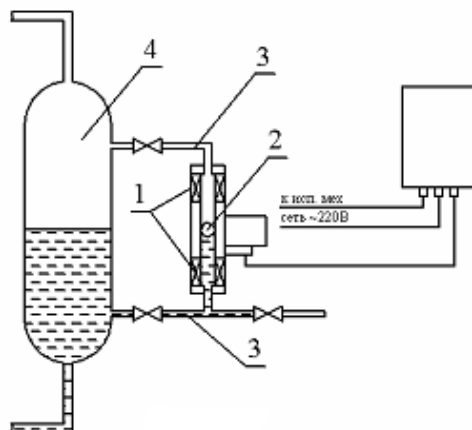


Рис. 3.34. Полупроводниковое реле уровня:
1 – катушки; 2 – шарик; 3 – уровни линий; 4 – резервуар

По закону сообщающихся сосудов положение шарика 2 будет соответствовать уровню жидкости в резервуаре. Одновременно шарик выполняет функции сердечника внутри катушек индуктивности, по мере изменения уровня жидкости будет изменяться индуктивное сопротивление катушек 1. Обмотки катушек индуктивности L_1 , L_2 , соединенных последовательно, через линию связи подключаются к входу вторичного прибора (рис. 3.35).

Обмотки катушки индуктивности L_1 , L_2 совместно с резисторами R_1 , R_2 вторичного прибора образуют индуктивно-резисторный мост, входной сигнал которого после выпрямителя поступает на усилитель ключевого типа (триггер), нагруженный на обмотки электромагнитного реле P_1 . Индуктивное сопротивление катушек изменяется с изменением положения сферического сердечника-поплавка, перемещающегося вместе с уровнем жидкости внутри поплавковой камеры. Если уровень жидкости занимает нижнее положение, то с измерительной диагонали моста формируется сигнал переменного тока такой фазы, что обмотка реле P_1 обесточена. При повышении уровня

поплавок датчика поднимается вверх и сигнал разбаланса меняет фазу, что приводит к срабатыванию реле P_1 . Напряжение срабатывания реле больше напряжения отпускания за счет дифференциала реле. Переменный резистор R_2 служит для настройки нижнего уровня срабатывания реле. Контакты реле $P_{1.1}$ и $P_{1.2}$ обеспечивают коммутацию цепей сигнализации и управления исполнительным механизмом подачи жидкости в резервуар.

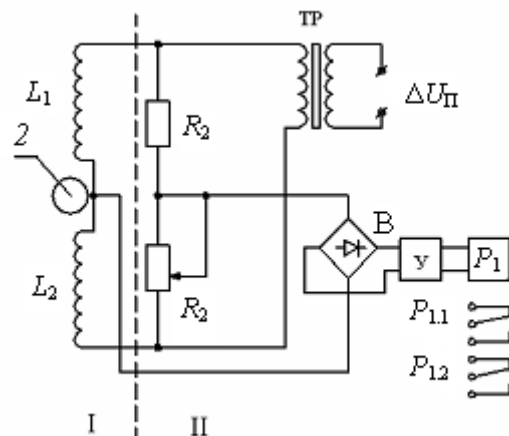


Рис. 3.35. Схема ПРУ-5:

I – поплавковая камера с шариком 2; II – вторичный прибор в виде электронного блока с резисторами R_1 , R_2 , питающим трансформатором ТР, выпрямителем В, усилителем У и электромагнитным реле P_1

Дифференциал, т. е. разность между нижним и верхним положениями поплавка в поплавковой камере, составляет 35–45 см. Для сигнализации и управления уровнем в крупногабаритных резервуарах ставят по высоте несколько таких приборов, обычно один на нижний уровень, второй на номинальное значение уровня, третий на верхнее значение уровня жидкости в резервуаре. Для предупреждения опасного режима и повышения надежности работы на предельное значение уровня ставят параллельно как минимум два прибора.

3.8. Газоанализаторы

Для определения концентрации того или иного газа в атмосфере используются газоанализаторы, позволяющие обнаружить присутствие даже малейших следов различных газов [7]. Газоанализаторы необходимы для предотвращения опасной концентрации

аммиака и фреонов в холодильных камерах, машинных отделениях, конденсаторных площадках и т. д.

Анализ газа возможен, если компонент, концентрация которого измеряется, отличается от остальных компонентов газовой смеси, по крайней мере, одним физико-химическим свойством. Выбор метода анализа газа сводится к нахождению специфического физико-химического свойства определенного компонента.

Наибольшее распространение получили газоанализаторы, принцип действия которых основан на измерении теплопроводности, термоманнитных и гальванических измерениях, измерениях оптических величин и хроматографическом анализе.

Как правило, для нормальной работы газоанализатора требуется осуществить ряд дополнительных действий, обеспечивающих подготовку газовой смеси к анализу: довести исследуемую смесь до требуемых значений давления и температуры, очистить ее от влаги, пыли и других фракций. Для этой цели часто применяют устройства, обеспечивающие расход газовой смеси или воздуха: газодувки, воздуходувки, насосы.

Наиболее удобной единицей концентрации газов является объемная доля в процентах, так как эта единица зависит от давления и температуры. Пределы измерения газоанализатора должны быть такими, чтобы нормальное рабочее значение концентрации измеряемого компонента составляло не менее $2/3$ от верхнего предела измерения.

В холодильных системах в основном применяются газоанализаторы, принцип действия которых основан на измерении теплопроводности газов, концентрацию которых нужно измерять. Это кондуктометрический метод. Следует отметить, что отличие коэффициентов теплопроводности воздуха и аммиака – газа невелико: для воздуха этот коэффициент составляет 0,024, а для аммиака – 0,021 Вт/(м·К); следовательно, приборы, показывающие значение концентрации газа, должны быть высокочувствительными.

Сущность данного метода заключается в следующем. Количественное значение теплопроводности анализируемой воздушно-газовой смеси сравнивается с теплопроводностью эталонного газа.

Принцип измерения заключается в электронагреве проволоочной нити, температура которой будет тем выше, чем ниже теплопроводность газа. Принципиальная схема такого устройства показана

на рис. 3.36. Через стеклянные трубки с платиновыми нитями (термосопротивления R_b и R_r , включенные в плечи мостовой схемы) прокачиваются чистый воздух R_b и исследуемая газовая смесь R_r . Мостовая схема запитана от источника U_n .

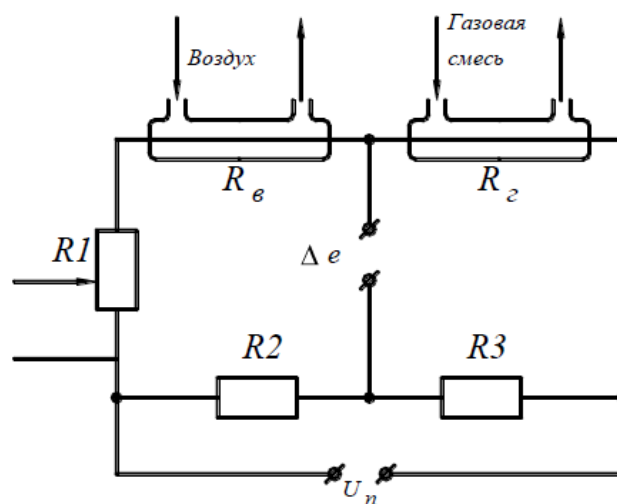


Рис. 3.36. Схема термокондуктометрического газоанализатора

При одинаковых условиях прокачки сопротивление плеч моста будет меняться. Количество теплоты, отдаваемой термосопротивлениями R_b и R_r в единицу времени, пропорционально величинам перегрева и теплопроводности окружающей газовой смеси. Изменение теплопроводности анализируемой смеси вызывает изменение температуры рабочего термосопротивления, что приводит к разбалансу моста и формированию в его измерительной диагонали ЭДС Δe , которая может быть измерена вторичным прибором со шкалой, откалиброванной в объемных долях анализируемого компонента. Переменное сопротивление R_1 предназначено для установки нуля в измерительной диагонали моста. В качестве вторичного прибора можно использовать либо милливольтметр высокого класса, либо автоматический потенциометр. К группе термокондуктометрических газоанализаторов относятся газоанализаторы типа ТГК.

Имеются термокондуктометрические газоанализаторы, построенные также на базе мостовой схемы, но с одной проточной стеклянной трубкой с платиновой спиралью (термосопротивление, которое включено в одно из плеч моста). Через патрубки стеклянной трубки прокачивается проба воздуха из помещения, и в измерительной диагонали формируется сигнал, пропорциональный температуре нити термосопротивления, т. е. теплопроводности исследуе-

мой пробы воздуха. Питание моста подбирается так, чтобы перегрев термосопротивления был не более 50–150 °С.

Для анализа воздуха помещений применяются также электрохимические газоанализаторы. Принцип их действия основан на изменении электропроводности электролитической ячейки, через которую прокачивается проба воздуха из помещения. Газ, который содержится в пробе воздуха, вступает в химическую реакцию с электролитом, за счет чего изменяется электрическое сопротивление ячейки. Концентрацию исследуемого газа можно определить либо по миллиамперметру, включенному последовательно с источником питания с электролитической ячейкой, либо включением последней в плечо мостовой схемы, как у кондуктометрических газоанализаторов. В качестве электролита обычно используют растворы кислот. Для аммиака, как правило, используется слабый раствор соляной кислоты.

Для проведения приближенного анализа состава газовой смеси используются индикаторные трубки, в которых содержится специальный реактив, меняющий свою окраску в зависимости от содержания в атмосфере соответствующего газа, если анализируемая смесь пропускается через эти трубки. Однако данный способ нельзя считать точным и можно отнести только к группе индикаторных приборов.

Для качественного анализа сложных смесей газов, жидкостей и твердых веществ применяются специальные приборы – хроматографы. В принцип действия газового хроматографа заложена различная степень адсорбируемости компонентов газовой смеси при прохождении ее через разделительную колонку, заполненную сорбентом (активированный уголь, силикагель или окись алюминия). В результате сорбции скорость движения отдельных компонентов анализируемой смеси меняется. Чем больше сорбируемого компонента, тем больше его торможение и меньше скорость через разделительную колонку, т. е. ввиду различия в скоростях компоненты отделяются друг от друга. По определенной очередности выхода компонентов газовой смеси устанавливается ее качественный состав.

3.9. Автоматические регуляторы

Технологические процессы, протекающие в промышленных агрегатах, находятся под воздействием внешних и параметрических возмущений, что вызывает отклонение параметров процесса от их

номинальных значений. Так, если взять в качестве примера холодильную камеру, то ее основные регулируемые параметры (температура воздуха и его относительная влажность) зависят от большого количества факторов: начальной температуры загружаемого груза, температуры наружного воздуха, эксплуатационных теплопритоков, качества изоляции и т. д. Для возвращения регулируемых параметров в требуемое состояние необходимо изменить энергетические потоки: изменить подачу охлаждающей жидкости, увеличить число работающих компрессоров и т. д. Эти функции выполняют автоматические регуляторы, которые совместно с объектом регулирования (ОР) образуют САР. Совокупность устройств, обеспечивающих реализацию заданного алгоритма управления в замкнутом контуре автоматической системы регулирования (АСР), называется автоматическим регулятором [10].

По принципу действия регуляторы бывают:

- прямого действия, которые обеспечивают регулирование параметра без подвода внешней энергии, т. е. чувствительный элемент одновременно выполняет функции исполнительного механизма. Примером может служить поплавковый регулятор уровня;

- косвенного действия, у них между датчиком и исполнительным механизмом имеется ряд дополнительных блоков. Структурная схема такого регулятора показана на рис. 3.37.

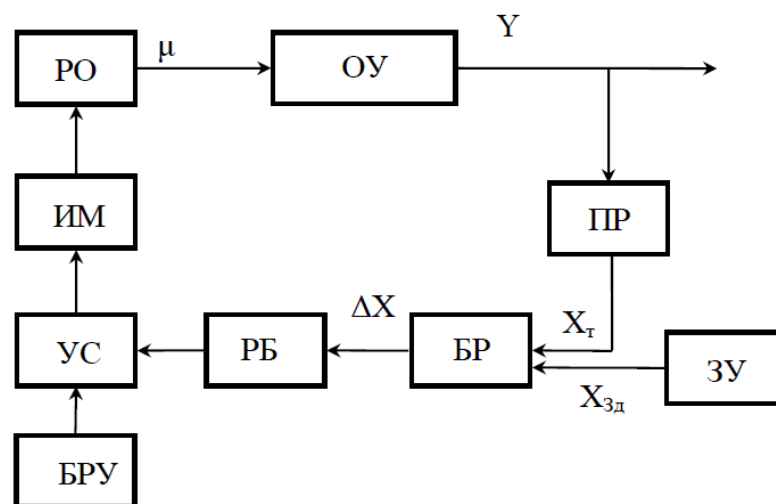


Рис. 3.37. Структурная схема регулятора косвенного действия

Обозначения на рис. 3.37: Пр – преобразователь регулируемого параметра Y в стандартный сигнал, удобный для дальнейшей обработки; БР – блок рассогласования, обеспечивающий формирование сигнала рассогласования $\Delta X = |X_{зд} - X_t|$ между заданным от задающего устройства (ЗУ) $X_{зд}$ и текущим X_t значениями регулируемого параметра Y ; РБ – регулирующий блок, предназначенный для формирования закона регулирования, который определяет качественные показатели системы регулирования – точность поддержания заданного параметра и время регулирования; БРУ – блок ручного управления, необходимый при настройке технологической линии, в которую внедряется регулятор; УС – усилитель мощности для усиления сигнала от РБ до значения мощности трогания регулирующего органа (РО), связанного с выходом исполнительного механизма (ИМ). Параметр μ непосредственно изменяет энергетический поток в объект управления (ОУ). Математическая зависимость $\mu = f(\Delta X)$ регулирующего воздействия μ от сигнала рассогласования ΔX называется законом регулирования.

3.9.1. Основные требования, предъявляемые к регуляторам

К автоматическим регуляторам предъявляется ряд требований, основными из которых являются следующие [10]:

а) обеспечение возможности подключения к датчикам различных видов. Сигналы на выходе датчика могут быть как унифицированными по системе ГСП (например, 0–5 мА и т. д.), так и неунифицированными, причем сигнал в датчиках может изменяться в широком диапазоне и иметь разную форму носителя информации. Для подключения датчиков к регулирующему устройству используется один из трех принципов: аппаратный, приборный или агрегатный [6].

При аппаратном принципе датчиком регулятора является специальное устройство, не связанное с системой контроля, т. е. измерения регулируемого параметра. Это датчики, преобразующие регулируемый параметр в сигнал другой физической сущности, удобный для дальнейшей обработки элементами регулирующего блока. Примером может служить термочувствительный баллон, заполненный легкокипящей жидкостью и преобразующий температуру среды в давление.

При приборном принципе датчик подключается к вторичному измерительному прибору; последний, как правило, имеет задатчик значения регулируемого параметра, тогда на выходе вторичного прибора сразу формируется сигнал рассогласования между заданным и действительным значениями регулируемого параметра. Примером могут служить автоматические мосты и автоматические потенциометры.

Агрегатный принцип используется при унифицированных сигналах на выходе датчиков. Этот принцип рекомендован ГСП и позволяет подключить любой датчик с унифицированным выходным сигналом к унифицированному входу регулирующего устройства. По этому принципу построено большинство современных регуляторов.

Задатчики регуляторов при приборном принципе построения встраиваются в приборы контроля, а при аппаратном и агрегатном – либо выполняются в виде самостоятельных устройств, либо встраиваются непосредственно в регулирующее устройство;

б) регуляторы должны иметь возможность изменения закона регулирования и параметров настройки регулятора и обеспечивать требуемую точность воспроизведения закона регулирования. Это требование объясняется различием динамических характеристик промышленных объектов и технологических требований к допустимым величинам отклонения регулируемых величин от требуемых значений;

в) автоматические регуляторы должны обеспечить достаточную мощность выходного сигнала, воздействующего посредством исполнительного механизма на регулируемый орган, который непосредственно изменяет значение энергетического или материального потока в объекте регулирования. Регулирующие органы, в зависимости от объекта управления, требуют усилия от нескольких грамм до нескольких тонн, для чего разработан стандартный ряд исполнительных механизмов различной мощности. Для подключения различных исполнительных механизмов к одним и тем же регулирующим устройствам регуляторы комплектуются дополнительными усилителями мощности;

г) к регуляторам предъявляются требования надежности работы и защиты от помех на линии связи между датчиком и входным устройством регулятора.

3.9.2. Основные законы регулирования и параметры настройки регуляторов

На основании математической зависимости между регулирующим воздействием μ и сигналом рассогласования ΔX , т. е. $\mu = f(\Delta X)$, различают двухпозиционный и функциональный законы регулирования.

В общем случае закон регулирования может быть записан в виде

$$\mu = - \left(c_0 \Delta X + c_1 \int_0^t \Delta X dt + c_2 \left(\frac{d\Delta X}{dt} \right) \right), \quad (3.3)$$

где c_0, c_1, c_2 – параметры настройки регулятора.

Знак «минус» означает компенсацию регулирующим воздействием μ возмущений, действующих на объект регулирования. Составляющая $c_0 \Delta X$ является пропорциональной составляющей «П» закона регулирования; $c_1 \int_0^t \Delta X dt$ – интегральной составляющей «И» закона регулирования; $c_2 \left(\frac{d\Delta X}{dt} \right)$ – дифференциальной составляющей «Д» закона регулирования. Различные комбинации составляющих образуют «ПИ», «ПД», «ИД» и «ПИД» законы регулирования. В холодильных системах из функциональных законов чаще применяют «П» и «ПИ», реже – «ПИД» законы регулирования.

Пропорциональный (статический) закон регулирования («П» закон) $c_1 = c_2 = 0$

Это автоматическое регулирование, при котором происходит изменение регулируемого параметра в определенном диапазоне, называемом диапазоном регулирования; регулирующий орган регулятора перемещается пропорционально этому изменению и занимает положение, соответствующее новому значению регулируемого параметра. Для этого закона характерно отклонение регулируемого параметра от его заданного значения. Это отклонение называется статической ошибкой. «П» закон регулирования записывается в виде алгебраического выражения

$$\mu = - K_p \Delta X, \quad (3.4)$$

где K_p – параметр настройки регулятора в виде коэффициента передачи регулятора.

Статическая и переходная характеристики для пропорционального закона показаны на рис. 3.38. На рисунке $\operatorname{tg} \alpha$ характеризуется коэффициентом передачи регулятора.

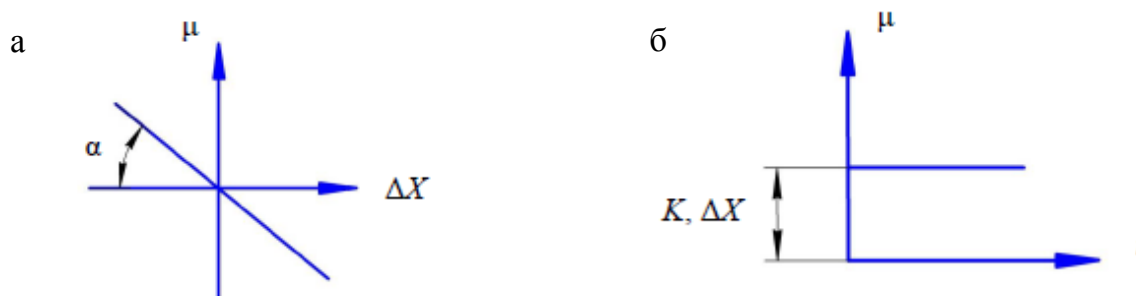


Рис. 3.38. Характеристики «П» закона регулирования:
а – статическая; б – переходная

Интегральный закон регулирования («И» закон) $c_0 = c_2 = 0$

Интегральные автоматические регуляторы обеспечивают перестановку регулирующего органа со скоростью, пропорциональной значению отклонения регулируемого параметра от заданного значения. Для интегрального закона характерно отсутствие статической ошибки и наличие ошибки по скорости перемещения регулирующего органа. Математическое выражение для этого закона имеет вид

$$\mu = -\left(\frac{1}{T_{\text{и}}}\right) \int_0^t \Delta X dt, \quad (3.5)$$

где $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования, являющаяся параметром настройки регулятора.

«И» регуляторы являются астатическими, поэтому статической характеристики не имеют. Переходная характеристика показана на рис. 3.39, где угол $\alpha = \operatorname{arctg} (1/T_{\text{и}})$.

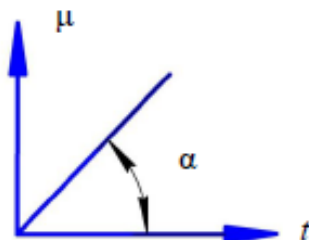


Рис. 3.39. Переходная характеристика «И» закона регулирования

Пропорционально-интегральный закон регулирования («ПИ» закон) $c_2 = 0$

Регулятор, построенный по этому закону, представляет собой комбинированный регулятор, сочетающий в себе свойства пропорционального и интегрального законов регулирования. Характерными особенностями этих регуляторов являются повышенное быстродействие по отношению к «И» регуляторам и отсутствие статической ошибки. Математическое выражение имеет вид

$$\mu = - \left(K_p \Delta X + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta X dt \right), \quad (3.6)$$

где K_p и T_i – параметры настройки регулятора.

Эти регуляторы еще называют изодромными, а время T_i – временем изодрома; физически T_i означает время, в течение которого выходной сигнал интегратора увеличивается в два раза по отношению к входному.

Интегратор имеется в структуре регулятора, благодаря чему отсутствует статическая ошибка, так как на выходе интегратора всегда будет формироваться линейный сигнал до тех пор, пока на его входе сигнал не обратится в ноль. Переходная характеристика регулятора показана на рис. 3.40. Как и для «И» регулятора, интегральная составляющая характеризуется наклоном под углом $\alpha = \arctg 1/T_i$.

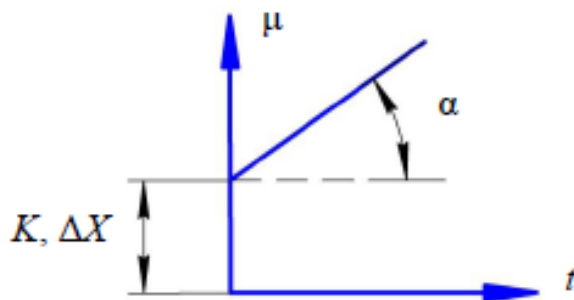


Рис. 3.40. «ПИ» закон регулирования

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования («ПИД» закон)

Для улучшения динамических свойств системы регулирования в «ПИД» закон регулирования вводят производную от сигнала рассогласования. Это позволяет в системе регулирования уменьшить

динамический заброс регулируемого параметра и число колебаний в переходном режиме этого параметра. Математическое выражение для этого закона регулирования имеет вид

$$\mu = - \left(K_p \Delta X + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta X dt + T_d \left(\frac{d\Delta X}{dt} \right) \right), \quad (3.7)$$

где K_p , T_i и T_d – параметры настройки регулятора, причем новая составляющая T_d – время предварения, которое математически означает время дифференцирования.

Введение производной влияет на качество регулирования только в случае изменения сигнала рассогласования во времени. Переходная характеристика регулятора показана на рис. 3.41, на котором выделены пропорциональная часть K_p регулятора, его время предварения T_d и время изодрома T_i , характеризующее угол наклона интегральной составляющей $\alpha = \arctg 1/T_i$. Напомним, что переходная характеристика – это реакция динамических звеньев на единичный скачок, поэтому на рис. 3.41 начальный участок характеристики стремится к бесконечности.

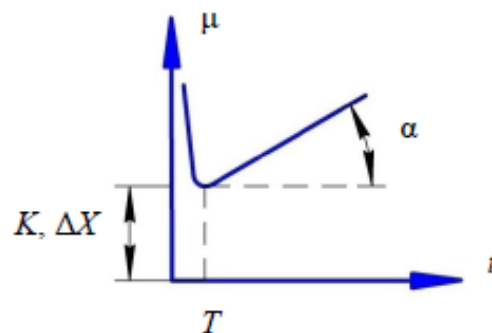


Рис. 3.41. «ПИД» закон регулирования

3.9.3. Двухпозиционный закон регулирования и двухпозиционные регуляторы

Регуляторы, построенные по двухпозиционному принципу, нашли широкое применение в холодильной технике. Во всем диапазоне изменения регулируемой величины исполнительный механизм либо его рабочий орган (например, клапан соленоидного вентиля) занимают только два фиксированных положения, соответствующих

полному открытию либо полному закрытию для протекания материального или энергетического потока в объект управления.

Если в качестве входного параметра взять регулируемый параметр Y , а выходного – регулирующее воздействие μ , то статическая характеристика двухпозиционного регулирования имеет вид, показанный на рис. 3.42.

Двухпозиционный регулятор имеет два параметра настройки: уставку регулируемого параметра (точка Y_2) и дифференциал $2\Delta = Y_3 - Y_1$, где Y_3 и Y_1 – максимальное и минимальное значения регулируемого параметра, соответственно.

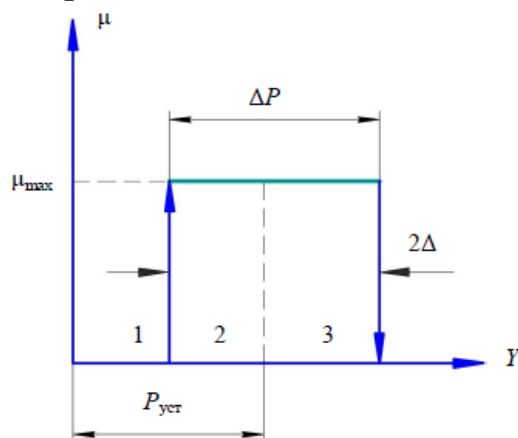


Рис. 3.42. Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

Характерными особенностями этих регуляторов являются, как правило, простота конструкции, настройки, удобство эксплуатации и ремонта. В то же время данные регуляторы имеют другую, менее желательную особенность: их применение в системе регулирования приводит к автоколебательному режиму работы регулируемого параметра, т. е. последний изменяется во времени в пределах от минимального до максимального значения. Параметры автоколебаний характеризуются амплитудой и частотой, значения которых определяются не только параметрами настройки регулятора, но и динамическими свойствами объекта регулирования.

Рассмотрим переходные процессы регулируемого параметра объекта управления без самовыравнивания. По оси ординат (рис. 3.43, а) отложены параметры статической характеристики двухпозиционного регулятора (см. рис. 3.41).

На рис. 3.43, б показано изменение регулирующего воздействия μ_1 при постоянном возмущающем воздействии μ_2 . В качестве

примера можно взять процесс регулирования уровня жидкости в сосуде равномерного поперечного сечения по высоте. Тогда регулируемым параметром будет являться уровень жидкости в сосуде, т. е. $Y = L$, регулирующим воздействием будет поступление жидкости $F_{пр}$, т. е. $\mu_1 = F_{пр}$, а возмущающим воздействием – отток жидкости из сосуда $F_{от}$, т. е. $\mu_2 - F_{от} = \text{const}$. За начальное условие возьмём нижний уровень жидкости, т. е. $Y_1 = L_1$ при $t = 0$. Как видно из статической характеристики, в момент $t = 0$ $\mu = \mu_{\max}$ и начинается заполнение сосуда до уровня $L_{3\max} = Y_3$, после чего $\mu_1 = 0$ и уровень жидкости падает до значения $L_{\min} = Y_1$. Далее процесс повторяется. Наклон переднего и заднего фронтов характеристики (см. рис. 3.43, а) определяется значениями μ_1 , μ_2 и параметрами объекта управления (в приведенном примере таким параметром будет площадь поперечного сечения сосуда).

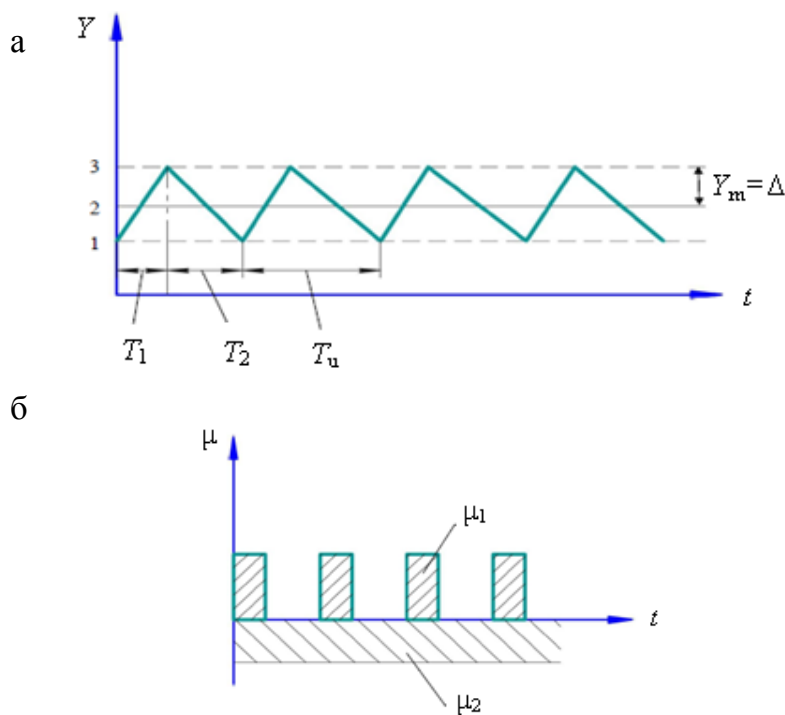


Рис. 3.43. Характеристики двухпозиционного регулятора

Для астатического объекта изменение регулируемого параметра описывается уравнением

$$S (dY/dt) = \mu_1 - \mu_2, \quad (3.8)$$

где S – параметр, характеризующий объект управления.

Автоколебания характеризуют следующие параметры:

– амплитуда автоколебаний, численно равная половине дифференциала статической характеристики, т. е.

$$Y_m = \Delta = |Y_{23}| = |Y_{12}|; \quad (3.9)$$

– частота автоколебаний $f = 1/T_{\text{ц}}$, где $T_{\text{ц}}$ – время цикла автоколебаний, определяемое временем начала подачи жидкости T_1 и временем прекращения подачи T_2 . Из уравнения (3.8) с учетом геометрической интерпретации производной можно записать

$$\begin{aligned} T_1 &= 2\Delta S/(\mu_1 - \mu_2); \quad T_2 = 2\Delta S/\mu_2; \\ T_{\text{ц}} &= T_1 + T_2 = 2\Delta S/(\mu_1 - \mu_2) \mu_1/\mu_2 = 2\Delta S/(\mu_1 - \mu_2) K_{\text{пр1}}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где $K_{\text{пр}} = \mu_1/\mu_2 > 1$ – кратность притока.

На основании (3.10)

$$f = (\mu_1 - \mu_2)/2\Delta S K_{\text{пр}}, \quad (3.11)$$

т. е. частота автоколебаний пропорциональна разности управляющего и возмущающего воздействий и обратно пропорциональна кратности притока, дифференциалу статической характеристики регулятора 2Δ и параметру объекта управления S .

Время подачи энергии в объект управления и время прекращения подачи характеризуются коэффициентом рабочего времени B :

$$B = T_1/T_{\text{ц}} < 1.$$

Амплитуду автоколебаний также называют ошибкой системы двухпозиционного регулирования, которую можно уменьшить, сузив петлю дифференциала статической характеристики. Уменьшение дифференциала одновременно приведет к увеличению частоты автоколебаний, как видно из выражения (3.11), а это, в свою очередь, к увеличению частоты срабатывания технических средств системы регулирования и, как следствие, к снижению надежности системы в целом. Поэтому при настройке двухпозиционного регулятора следует находить разумное соотношение между ошибкой системы и частотой срабатывания исполнительной части.

Если в системе регулирования имеется звено с емкостным или транспортным запаздыванием, то это существенно изменит параметры автоколебаний регулируемой величины.

Влияние звена с запаздыванием на параметры автоколебаний

Положим, что существует запаздывание между регулирующим воздействием и реакцией регулируемого параметра на это воздействие. Примером может служить транспортное запаздывание между открытием вентиля подачи ледяной воды в бак и началом подачи воды непосредственно в бак из-за удаленности вентиля подачи от бака. В этом случае автоколебания, параметры которых приведены на рис. 3.42, изменяют свои значения (рис. 3.44 а, б).

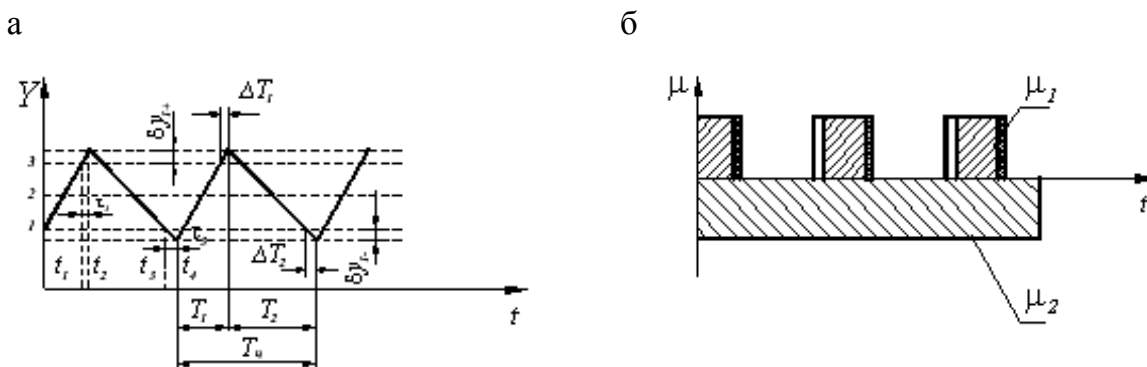


Рис. 3.44. Влияние запаздывания на параметры регулирования

В момент времени t_1 от регулятора поступает сигнал на прекращение подачи воды в бак, но за счет транспортного запаздывания τ_3 вода продолжает поступать. В момент времени t_3 поступает сигнал на подачу воды, но она начинает поступать только в момент времени t_4 за счет того же времени запаздывания τ_3 .

Дадим количественную оценку изменения параметров автоколебаний. Структура уравнения (3.11), описывающего поведение параметра, не изменится.

Однако происходит приращение амплитуды автоколебаний на величины δy_{1+} и δy_{1-} , которые будут равны в одном частном случае – при кратности притока, равной двум ($K_{пр} = 2$), так как только в этом случае углы наклона подъёма и спада характеристики (см. рис. 3.44, а) по абсолютной величине будут одинаковыми.

В общем случае:

амплитуда положительного отклонения увеличится на значение

$$\delta y_{1+} = ((\mu_1 - \mu_2)/S) \tau_3; \quad (3.12)$$

приращение амплитуды отрицательного отклонения

$$\delta y_{1-} = (\mu_2/S) \tau_3; \quad (3.13)$$

суммарная амплитуда отклонений

$$\delta y_{1+} + |\delta y_{1-}| = (\mu_1/S) \tau_3; \quad (3.14)$$

приращение времени подачи жидкости

$$\Delta T_1 = (\mu_1/(\mu_1 - \mu_2)) \tau_3; \quad (3.15)$$

приращение времени прекращения подачи жидкости

$$\Delta T_2 = (\mu_1/\mu_2) \tau_3 = K_{\text{пр}} \tau_3; \quad (3.16)$$

приращение времени цикла

$$\Delta T_{\text{ц}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 = (K_{\text{пр}}/(\mu_1 - \mu_2)) \mu_1 \tau_3. \quad (3.17)$$

Ясно, что приращение времени цикла приведет к снижению частоты автоколебаний, а именно:

$$\Delta f = (\mu_1 - \mu_2)/(K_{\text{пр}} \mu_1 \tau_3). \quad (3.18)$$

Кроме того, при кратности притока, отличной от двух, происходит смещение среднего уровня, т. е. «уход» уставки, значение которого можно получить из выражений (3.12) и (3.13):

$$\Delta y_{\text{см}} = 0,5(\delta y_{1+} - |\delta y_{1-}|) = (\tau_3/S) (0,5\mu_1 - \mu_2). \quad (3.19)$$

Для частичной компенсации вышеперечисленных факторов при наличии в системе двухпозиционного регулирования звена с запаздыванием возможны следующие варианты:

а) уменьшение дифференциала регулятора (не следует забывать, что при этом увеличивается частота автоколебаний);

б) увеличение параметра S объекта управления, что возможно на стадии проектирования холодильной системы;

в) уменьшение транспортного запаздывания между исполнительной частью и объектом управления;

г) обеспечение регулирования неполным притоком.

Смысл последнего пункта «г» поясняется на рис. 3.45, а. Через вентиль В1 поступает материальный поток (газ, жидкость) в объект управления постоянно, т. е. $\mu_1 = \text{const}$, но $\mu_1 < \mu_2$. Через вентиль В3 забирается материальный поток потребителем, причем $\mu_2 = \text{const}$. Через вентиль В2 обеспечивается подача потока μ_1^1 по двухпозиционному принципу, как показано на рис. 3.45, б. В этом случае частота срабатывания вентиля В2 значительно уменьшается даже при малом дифференциале регулятора, а значит, увеличивается надежность работы системы регулирования в целом.

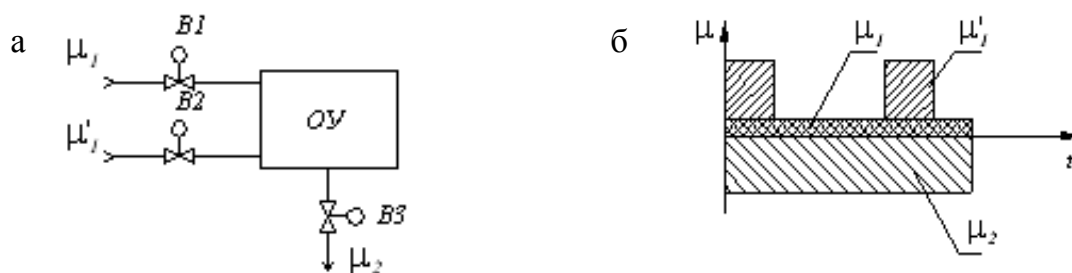


Рис. 3.45. Процесс регулирования неполным притоком

Рассмотрим переходные процессы регулируемого параметра объекта управления с самовыравниванием. Ранее (см. рис. 2.4) был приведен пример регулирования температуры воздуха холодильной камеры. Полагаем, что регулятор двухпозиционный, на котором выставлены дифференциал и уставка температуры воздуха холодильной камеры. При выходе температуры воздуха за пределы дифференциала обеспечивается включение или выключение регулирующего органа, стоящего на линии подачи хладоносителя (или хладагента) в теплообменный аппарат.

Для определенности возьмем значение уставки температуры $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а дифференциала $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. при температуре воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ регулирующий орган перекрывает подачу хладоносителя, а при $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

открывает подачу. Однако следует заметить, что при достижении температуры $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, несмотря на включение подачи хладагента, температура воздуха будет продолжать повышаться за счет инерционности холодильной камеры, а также за счет емкостного запаздывания, только достигнув, например, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, начнет понижаться. Аналогичная ситуация будет и при охлажденном воздухе, когда температура воздуха может понизиться до $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, несмотря на выключенную подачу хладагента в испаритель. Таким образом, реальный диапазон изменения температуры будет несколько больше дифференциала.

Описанный эффект выхода регулируемого параметра за пределы дифференциала регулятора будет проявляться сильнее при малых значениях дифференциала регулятора, так как в его пределах регулируемый параметр не успевает достичь установившегося значения, которое характерно для статического объекта. В отличие от астатического объекта, изменение регулируемого параметра у статического объекта происходит по экспоненте, как показано на рис. 3.46, а.

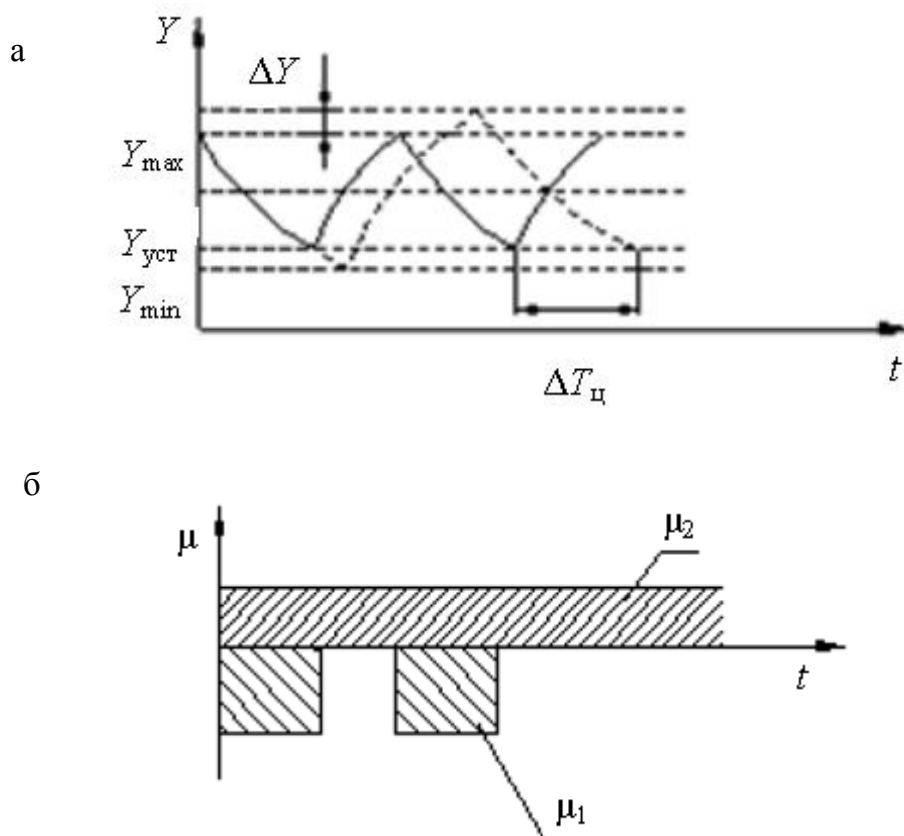


Рис. 3.46. Характеристики двухпозиционного регулирования:
 Y – регулируемый параметр; μ_1 – регулирующее воздействие;
 μ_2 – возмущающее воздействие

Для рассмотренного на рис. 3.46, а примера принято: устав-ка $Y_{уст}$ соответствует температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, Y_{max} – температуре $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, Y_{min} – температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Регулирующее воздействие μ_1 на рис. 3.46, б соответствует включению регулирующего органа на линии подачи хладоносителя в теплообменный аппарат, а возмущающее воздействие μ_2 характеризует теплопритоки, действующие на теплообменный аппарат. Для упрощения задачи принято $\mu_2 = \text{const}$.

На рис. 3.46, а сплошной линией показан экспоненциальный характер изменения температуры воздуха в пределах дифференциала регулятора без учета инерционности холодильной камеры, пунктирной линией – с учетом инерционности камеры. Как видно из графика на рис. 3.46, а, емкостное запаздывание в статическом объекте тоже влияет на параметры автоколебаний, а именно, увеличивает амплитуду автоколебаний на ΔY и время цикла на $\Delta T_{ц}$ и, как следствие, уменьшает частоту автоколебаний.

Частичная компенсация влияния времени запаздывания на параметры автоколебаний рекомендуется по тем же вариантам, что и для астатических объектов. В холодильных системах наибольшее применение получили двухпозиционные регуляторы давления, температуры и уровня хладагента в емкостях.

3.9.4. Аппаратные средства микропроцессорной техники

Микропроцессорная техника – поколение средств управления, которое включает в себя микропроцессорные, интегральные системы, микроЭВМ, контроллеры, программируемые микропроцессорные контроллеры ПМК, а также ПЭВМ.

Микропроцессорная техника состоит из аппаратных устройств и программных продуктов (средств). Технические аппаратные средства предназначены для первичной обработки технологической информации, собранной посредством датчиков, отображения информации для обслуживающего персонала, обработки, формирования и выдачи управляющих воздействий на исполнительные устройства.

Первичная обработка информации включает усреднение, масштабирование, сравнение с заданными значениями, а также (при необходимости) реализацию некоторых математических операций.

Формирование управляющих воздействий выполняется с помощью автоматических регуляторов, программируемых контроллеров, реализующих стандартные законы регулирования.

Функциональная схема измерителей-регуляторов представлена на рис. 3.47, где со стороны входа измерителя-регулятора при использовании датчиков с унифицированным выходным сигналом тока или напряжения предусматривается возможность масштабирования, т. е. устанавливаются верхняя и нижняя границы диапазона измерения, а также положение десятичной точки.

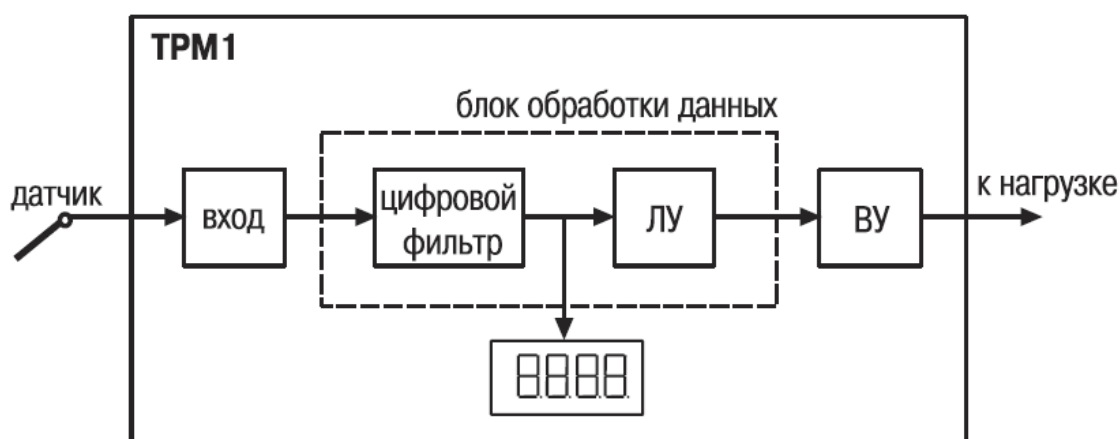


Рис. 3.47. Функциональная схема измерителей-регуляторов

Для устранения начальной погрешности преобразования входных датчиков и погрешностей, вносимых соединительными проводами, измеренное значение может быть откорректировано. В большинстве приборов существует два вида коррекции, позволяющих осуществить сдвиг или изменение наклона измерительной характеристики на заданную величину (рис. 3.48).

Цифровая фильтрация входного сигнала уменьшает влияние случайных импульсных помех на показания. В большинстве измерителей-регуляторов предусмотрена двухступенчатая фильтрация: «полосовая», устраняющая единичные помехи, и «сглаживающая», снижающая действие небольших высокочастотных помех.

Параметр «полоса фильтра» позволяет защитить измерительный тракт от сильных единичных помех. Полоса фильтра задается в единицах измеряемой величины. Если текущее показание отличается от предыдущего измеренного значения более чем на значение этого параметра, то оно игнорируется, и прибор производит повторное измерение (рис. 3.49). На цифровом индикаторе остается зна-

чение предыдущего измерения. Малая ширина полосы фильтра приводит к замедлению реакции прибора на быстрое изменение входной величины. Поэтому при низком уровне помех или при работе с быстроменяющимися процессами рекомендуется увеличить значение параметра или задать его равным нулю. В случае работы в условиях сильных помех для устранения их влияния на работу прибора необходимо уменьшить значение параметра. При этом возможно ухудшение быстродействия прибора из-за повторных измерений.

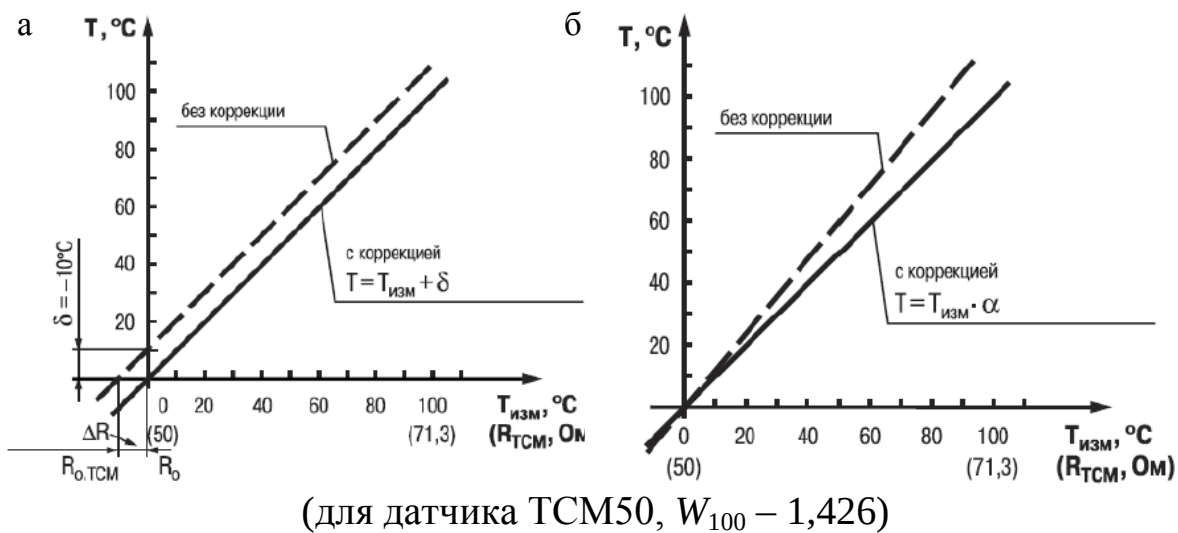


Рис. 3.48. Способы коррекции погрешностей датчиков:
а – сдвиг характеристики; б – изменение наклона характеристики

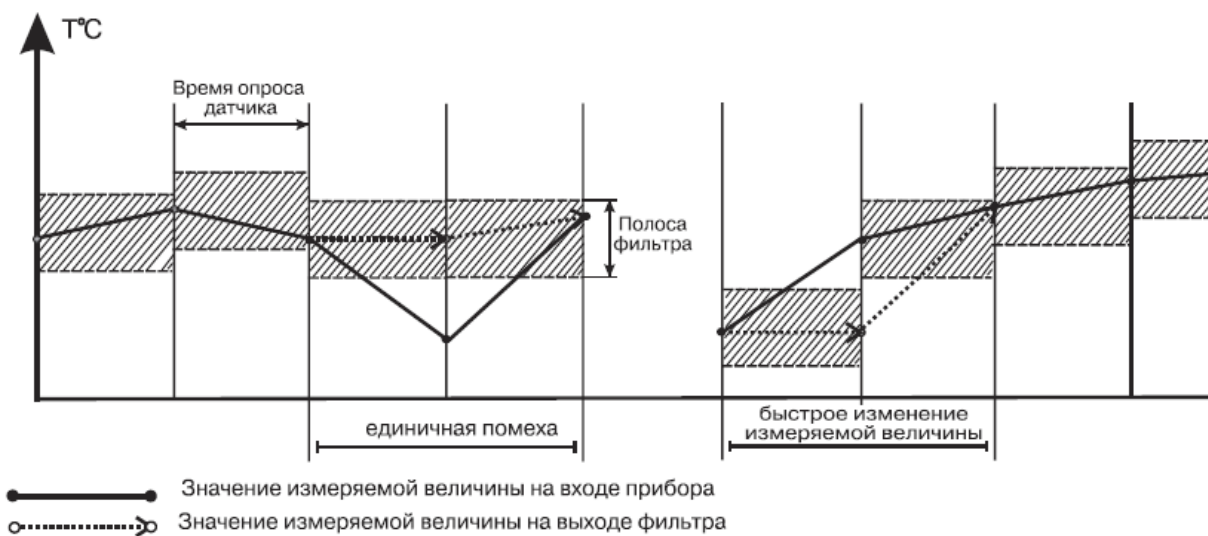


Рис. 3.49. Схемы фильтрации измеряемых величин

Параметр «глубина фильтра» позволяет добиться «сглаживания» изменений показаний прибора за счет их усреднения. Значение этого параметра задает количество последних измерений N , для которых прибор вычисляет среднее арифметическое. Полученная величина используется прибором в дальнейшей работе.

Вид переходных характеристик фильтра для разных N показан на рис. 3.50.

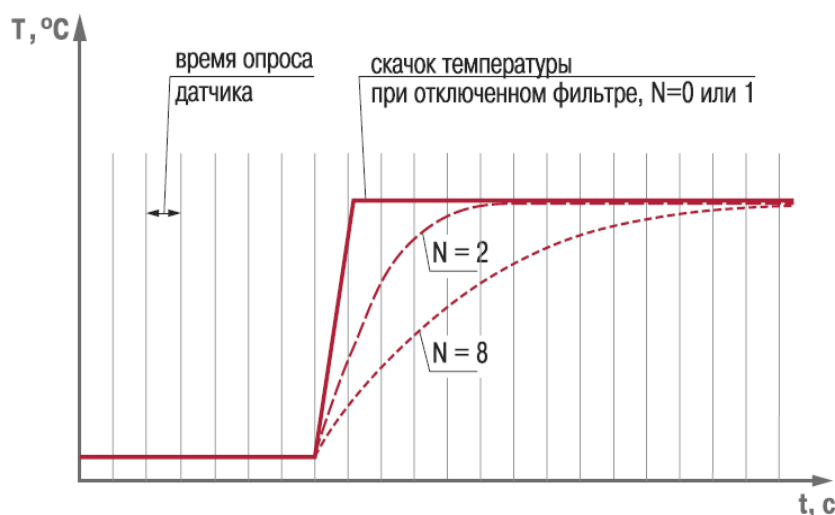


Рис. 3.50. Характеристики фильтра для разных N

Уменьшение значения глубины фильтра приводит к более быстрой реакции прибора на скачкообразные изменения контролируемой величины, но снижает помехозащищенность и вместе с этим повышает инерционность прибора.

Параметр «постоянная времени фильтра» τ_f позволяет осуществлять экспоненциальное сглаживание. Постоянной времени фильтра называют интервал, в течение которого выходной сигнал достигает 0,63 от величины окончательного значения (100 °C).

На рис. 3.51 показана реакция фильтра на единичный скачок температуры при различных τ_f . Большое значение τ_f приводит к замедлению реакции прибора на изменение входной величины, но помехи значительно подавлены (кривая I). Малые значения τ_f позволяют довольно точно отслеживать изменения входной величины, но уровень помех практически не уменьшается (кривая II).

Логические устройства (ЛУ) в соответствии с заданными пользователем параметрами формируют сигналы управления, которые

через выходные устройства приборов (реле, транзисторные ключи и т. п.) подаются на исполнительные устройства (механизмы).

Логическое устройство может работать в следующих режимах: измеритель-регистратор, двухпозиционный регулятор, аналоговый регулятор.

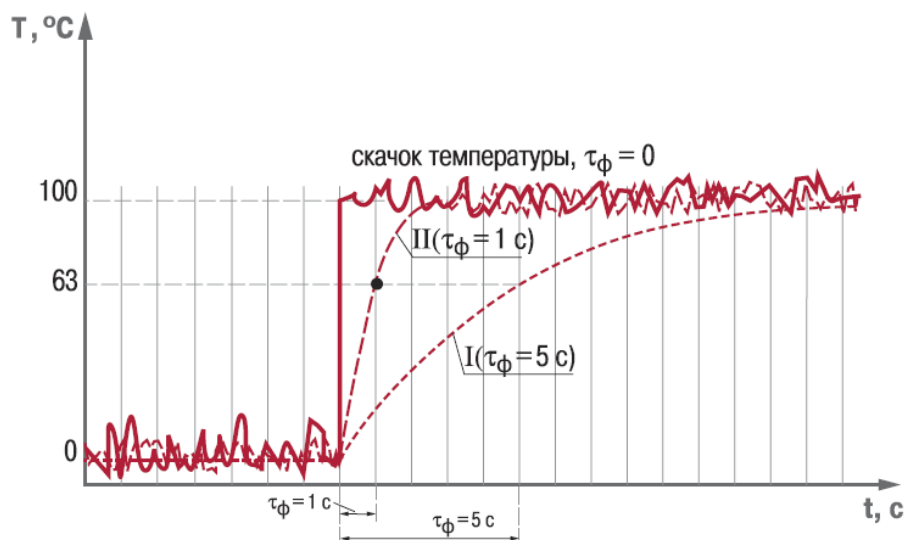


Рис. 3.51. Влияние «постоянной времени фильтра» на скорость реакции прибора

При работе в режиме «измеритель-регистратор» ЛУ преобразует входную величину в аналоговый сигнал в виде тока 4–20 мА, который можно подавать на самописец или другое регистрирующее устройство (рис. 3.52).

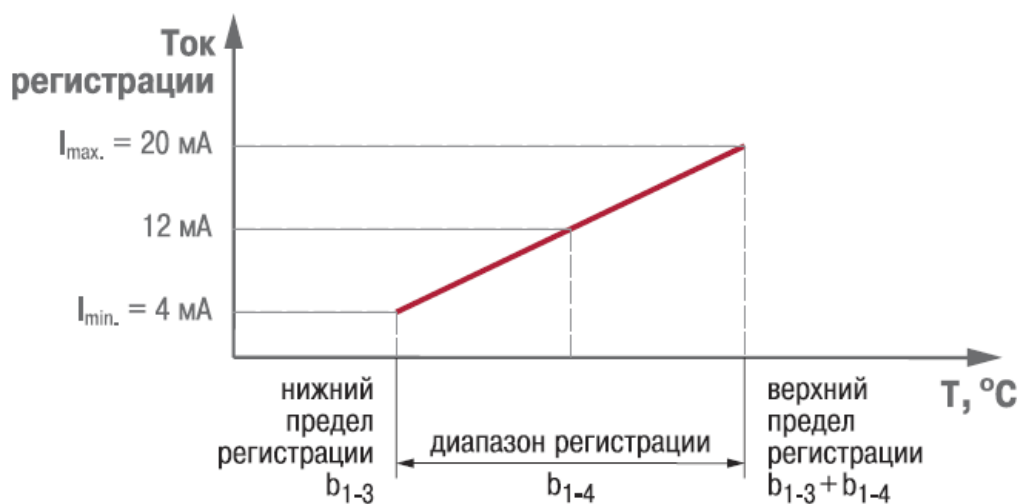


Рис. 3.52. Работа ЛУ в режиме «измеритель-регистратор»

В режиме двухпозиционного регулятора компаратор ЛУ сравнивает значение входной величины с уставками и выдает управляющий сигнал на выходное устройство в соответствии с заданной логикой. Выходной сигнал двухпозиционного регулятора может иметь только два значения – максимальное и минимальное. При одном из них включается, а при другом – выключается выходное устройство. Поэтому для работы ЛУ в режиме двухпозиционного регулятора требуется выходное устройство ключевого типа (реле, транзисторная оптопара или оптосимистор). Тип логики двухпозиционного регулятора, уставка $T_{уст}$ и гистерезис Δ задаются пользователем при программировании прибора.

Тип логики 1 (прямой гистерезис) применяется в случае использования прибора для управления работой нагревателя (например, ТЭНа) или сигнализации о том, что значение текущего измерения T меньше уставки $T_{уст}$. При этом выходное устройство, подключенное к ЛУ, первоначально включается при значениях $T < T_{уст} - \Delta$; выключается при $T > T_{уст} + \Delta$ и вновь включается при $T < T_{уст} - \Delta$, осуществляя тем самым двухпозиционное регулирование температуры объекта по уставке $T_{уст}$ с гистерезисом $\pm \Delta$.

Тип логики 2 (обратный гистерезис) применяется в случае использования прибора для управления работой «холодильника» (например, вентилятора) или сигнализации с превышением значения уставки. При этом выходное устройство первоначально включается при значениях $T > T_{уст} + \Delta$, выключается при $T < T_{уст} - \Delta$ и вновь включается при $T > T_{уст} + \Delta$, также осуществляя двухпозиционное регулирование.

Тип логики 3 (П-образная) применяется при использовании прибора для сигнализации о входе контролируемой величины в заданные границы. При этом выходное устройство включается при $T_{уст} - \Delta < T < T_{уст} + \Delta$.

Тип логики 4 (U-образная) применяется при использовании приборов для сигнализации о выходе контролируемой величины за заданные границы. При этом выходное устройство включается при $T < T_{уст} - \Delta$ и $T > T_{уст} + \Delta$.

На рис. 3.53 представлены четыре варианта работы логики.

Наиболее эффективный и распространенный вид регулятора – это пропорционально-интегрально-дифференциальный («ПИД» регулятор), обеспечивающий достаточно высокую точность при управ-

лении различными процессами. «ПИД» регулятор вырабатывает выходной сигнал, который рассчитывается по следующей формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left[E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t} + \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t \right] 100 \%,$$

где X_p – полоса пропорциональности; E_i – рассогласование; τ_d – постоянная времени дифференцирования; ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ; Δt – время между двумя соседними измерениями T_i и T_{i-1} ; $\tau_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования; $\sum_{i=0}^n E_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

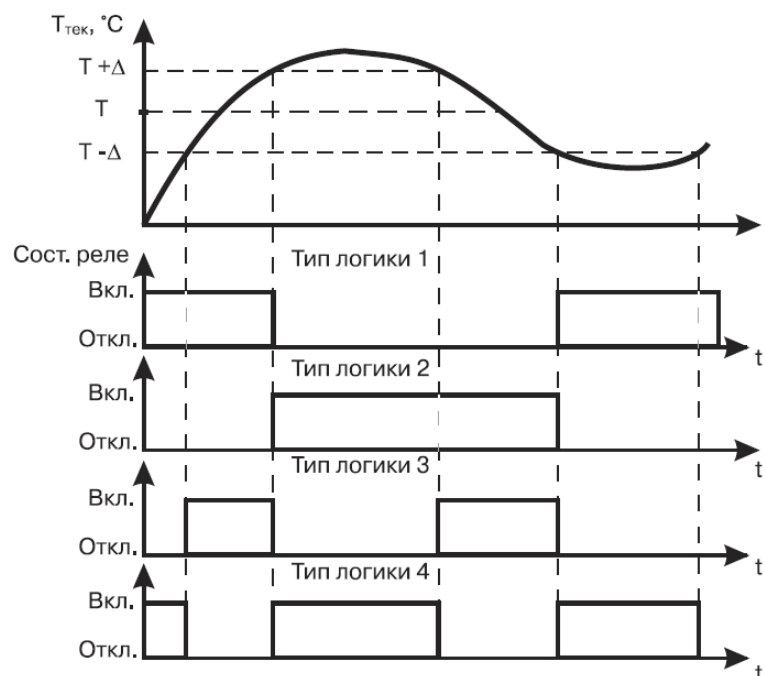


Рис. 3.53. Различные режимы работы логического устройства

Как видно из формулы, сигнал управления является суммой трех составляющих.

Пропорциональная составляющая зависит от рассогласования E_i и отвечает за реакцию на мгновенную ошибку регулирования.

Интегральная составляющая содержит в себе накопленную ошибку регулирования, которая является дополнительным источником выходной мощности и позволяет добиться максимальной скорости достижения уставки при отсутствии перерегулирования.

Дифференциальная составляющая зависит от скорости изменения параметра $\Delta E_i / \Delta t_{\text{изм}}$, вызывающей реакцию регулятора на резкое изменение измеряемого параметра, возникшее, например, в результате внешнего возмущающего воздействия. Для эффективной работы «ПИД» регулятора необходимо подобрать для конкретного объекта регулирования значения коэффициентов X_p , τ_d и τ_i «ПИД» регулятора. Это можно сделать вручную или воспользоваться автонастройкой.

В режиме аналогового регулятора логическое устройство рассчитывает отклонение E текущего значения контролируемой величины T от заданной уставки $T_{\text{уст}}$ (рассогласование). В результате на выходе вырабатывается аналоговый сигнал Y , направленный на уменьшение рассогласования E . Этот сигнал подается на исполнительное устройство регулятора в виде тока или последовательности импульсов (ШИМ).

Если в качестве выходного устройства прибора используется реле, выходной сигнал преобразуется в последовательность управляющих импульсов с длительностью D :

$$D = Y \frac{T_{\text{сл}}}{100 \%},$$

где D – длительность импульса, с; $T_{\text{сл}}$ – период следования импульсов; Y – выходной сигнал регулятора.

Пропорциональный закон регулирования («П» закон)

При цифровой реализации «П» закона регулирования выходной сигнал регулятора Y_i пропорционален величине рассогласования E_i , т. е.

$$Y = \frac{1}{X_p} E_i \cdot 100 \%,$$

где X_p – полоса пропорциональности, в пределах которой эта формула справедлива; E_i – разность между заданным $T_{\text{уст}}$ и текущим T_i значениями измеряемой величины, или рассогласование.

Полоса пропорциональности X_p , как и отклонение E , выражается в единицах контролируемого параметра. Чем шире полоса пропорциональности X_p , тем меньше величина выходного сигнала Y при одном и том же отклонении E .

На рис. 3.54 показан характер влияния на выходной сигнал длительности управляющих импульсов при разных значениях X_p и $E = 10$. Вне полосы пропорциональности выходной сигнал Y равен 0, или 100 %.

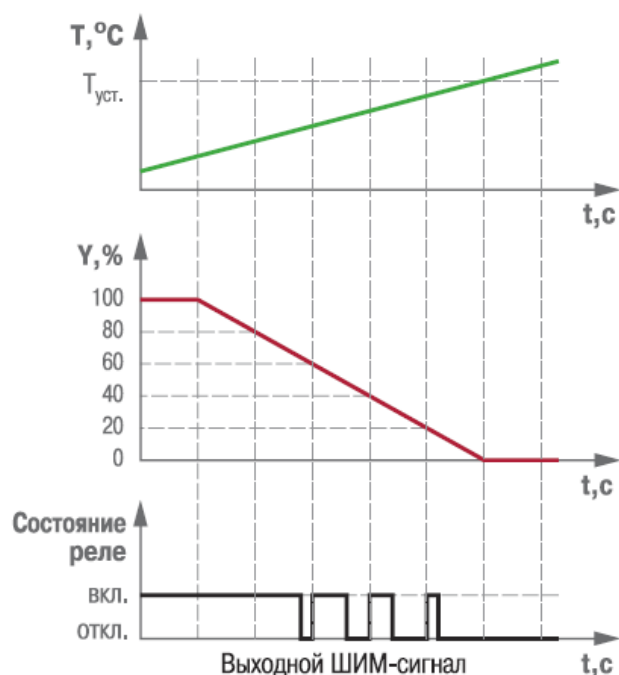


Рис. 3.54. Принцип ШИМ для нагревателя

При действии «П» закон регулятор выдает импульсы, в которых присутствует только пропорциональная составляющая величины выходного сигнала.

На рис. 3.55 показана зависимость выходного сигнала «П» регулятора от рассогласования при разных значениях X_p .

Пропорционально-дифференциальное регулирование («ПД» закон)

При работе прибора в режиме «ПД» регулятора величина выходного сигнала Y_i зависит не только от величины отклонения E_i , но и от скорости его изменения (рис. 3.56):

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left[E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} \right] 100 \%,$$

где X_p – полоса пропорциональности; E_i – рассогласование; τ_d – постоянная времени дифференцирования; ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ; $\Delta t_{\text{изм}}$ – время между двумя соседними измерениями T_i и T_{i-1} ; $\Delta E_i / \Delta t_{\text{изм}}$ – скорость изменения рассогласования E_i .

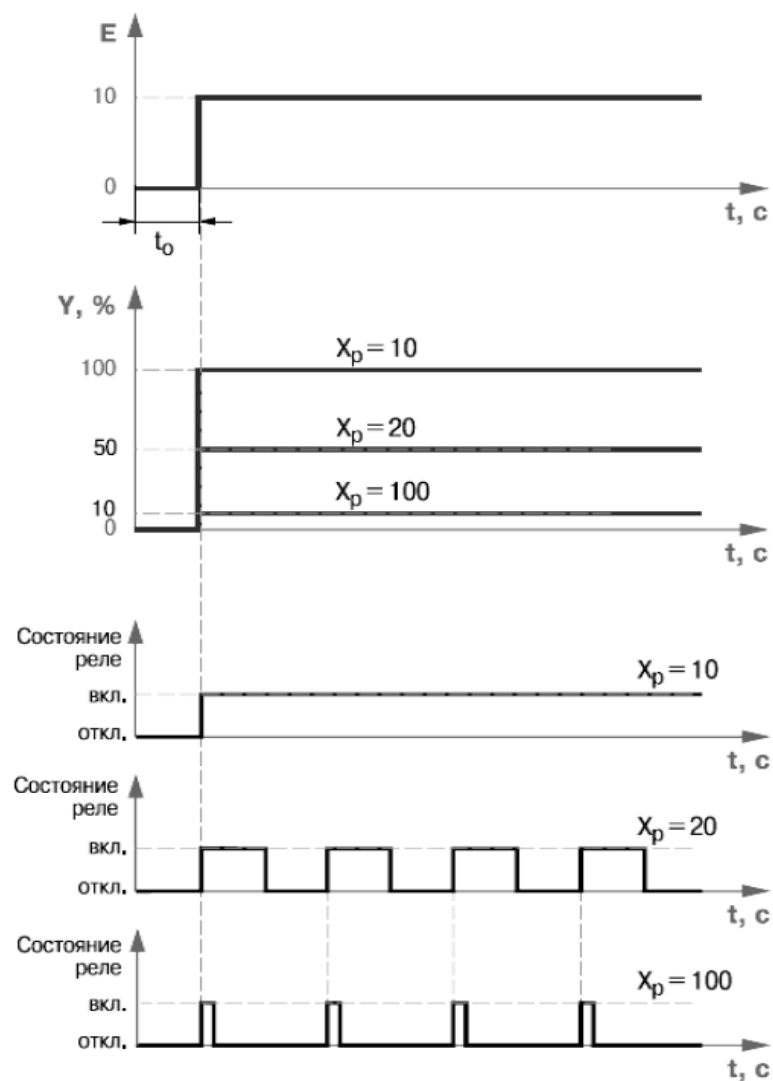


Рис. 3.55. Характеристики «П» регулятора при разных режимах уставки

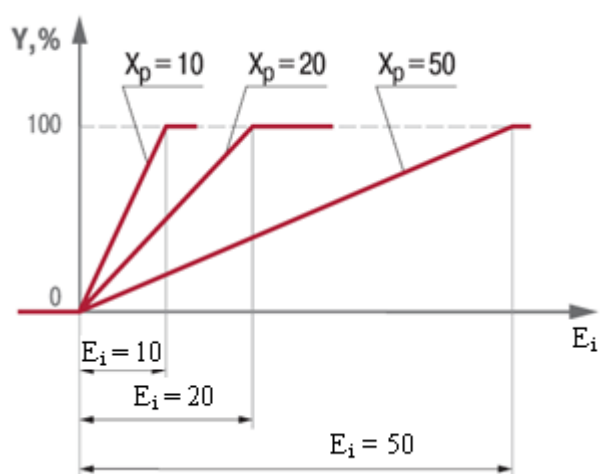


Рис. 3.56. Характеристика выходного сигнала «ПД» регулятора при переменных E_i и X_p

Изменение выходного сигнала регулятора при ступенчатом изменении отклонения показано на рис. 3.57. В первый период после ступенчатого изменения E_i регулятор выдает управляющий импульс, в котором кроме пропорциональной составляющей, вызванной рассогласованием E_i , имеется дифференциальная ΔY_d , зависящая от величины ΔE_i и коэффициента τ_d . В последующих импульсах присутствует только пропорциональная составляющая, так как нет изменения E_i .

На рис. 3.57 показаны также состояние реле выходного устройства и длительность управляющих импульсов при разных значениях τ_d и $E = 10$.

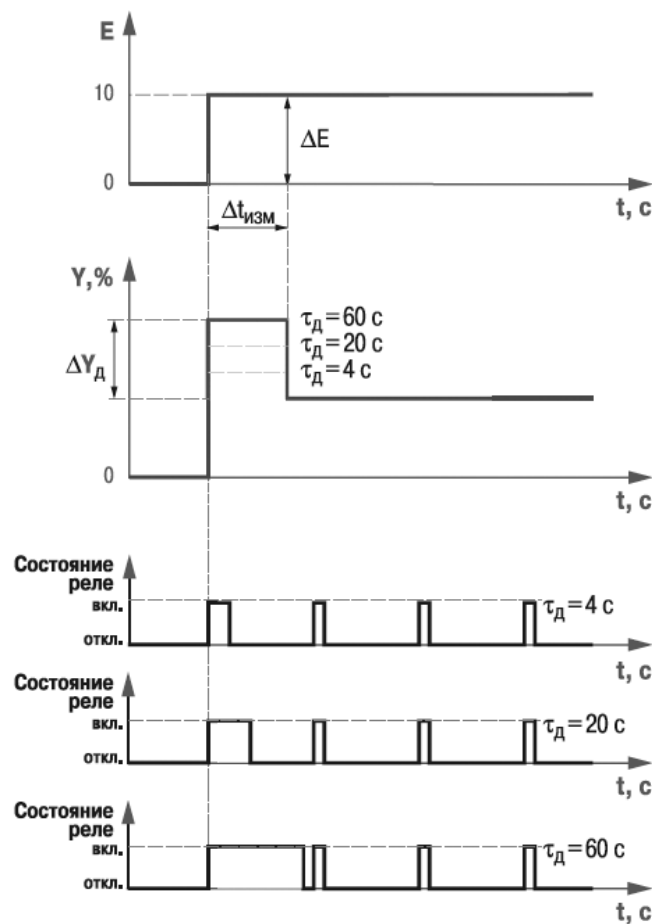


Рис. 3.57. Состояния выходного сигнала «ПД» регулятора и реле выходного устройства при разных режимах регулирования

Пропорционально-интегральное регулирование («ПИ» закон)

При работе в режиме «ПИ» регулятора величина выходного сигнала Y_i зависит как от величины рассогласования E_i , так и от суммы предыдущих рассогласований:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left[E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t \right] 100 \%,$$

где X_p – полоса пропорциональности; E_i – отклонение; τ_i – постоянная времени интегрирования; $\sum_{i=0}^n E_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

Из рис. 3.58 видно, что в первый момент времени, когда нет отклонения ($E_i = 0$), нет и выходного сигнала ($Y_i = 0$).

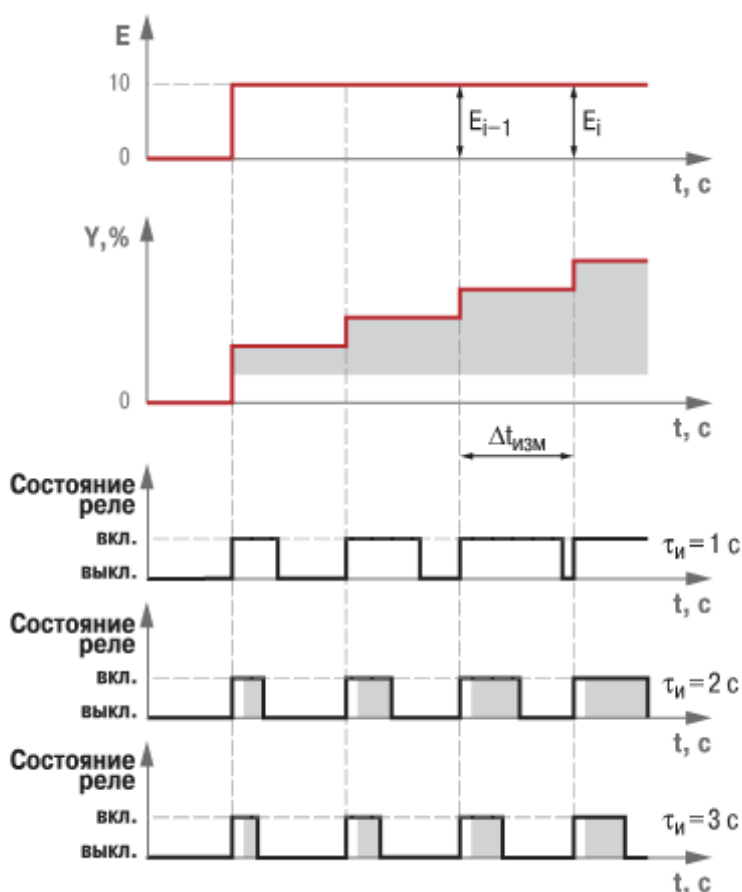


Рис. 3.58. Состояния выходного сигнала «ПИ» регулятора и реле выходного устройства при разных режимах регулирования

С появлением отклонения E_i появляются импульсы, длительность которых постепенно увеличивается. В импульсах присутствует пропорциональная составляющая, которая зависит от величины E_i (незаштрихованная часть импульсов) и интегральной составляющей (заштрихованная часть). Увеличение длительности импульсов происходит за счет роста интегральной составляющей, которая зависит от рассогласования E_i и коэффициента τ . На рис. 3.58 показано также состояние реле выходного устройства и длительность управляющих импульсов при разных значениях τ_i и $E_i = 10$.

Параметры «ПИД» регулирования

Для исключения излишнего срабатывания регулятора при небольшом значении рассогласования E_i для вычисления значений Y_i используют уточненное значение E_p , вычисленное в соответствии со следующими условиями:

$$\begin{aligned} \text{если } |E_i| \leq X_d, & \text{ то } E_p = 0; \\ \text{если } E_i > X_d, & \text{ то } E_p = E_i - X_d; \\ \text{если } E_i < -X_d, & \text{ то } E_p = E_i + X_d, \end{aligned}$$

где X_d – зона нечувствительности (рис. 3.59).

Прибор будет выдавать управляющий сигнал только после того, как регулируемая величина выйдет из этой зоны. Зона нечувствительности не должна превышать необходимую точность регулирования.

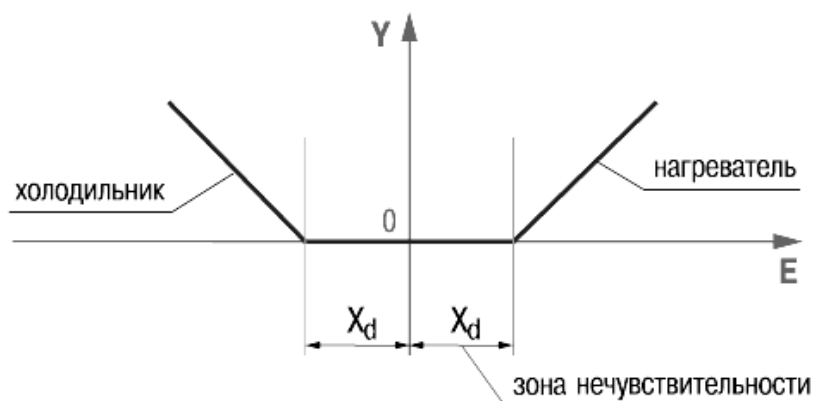


Рис. 3.59. Параметры «ПИД» регулятора

Ограничение управляющего сигнала

Так как рабочий диапазон исполнительного механизма всегда ограничен, для выходного управляющего сигнала $Y_{\text{вых}}$ задаются ограничения в виде максимального и минимального значений (рис. 3.60). Если выходной сигнал регулятора Y превышает заданную величину $Y_{\text{огр.max}}$, то на исполнительное устройство выдается сигнал $Y_{\text{огр.max}}$; если сигнал меньше заданной величины $Y_{\text{огр.min}}$, то выдается сигнал $Y_{\text{огр.min}}$. Кроме того, в некоторых регуляторах можно задать скорость изменения выходного сигнала, что позволяет избежать резких воздействий на исполнительные устройства.

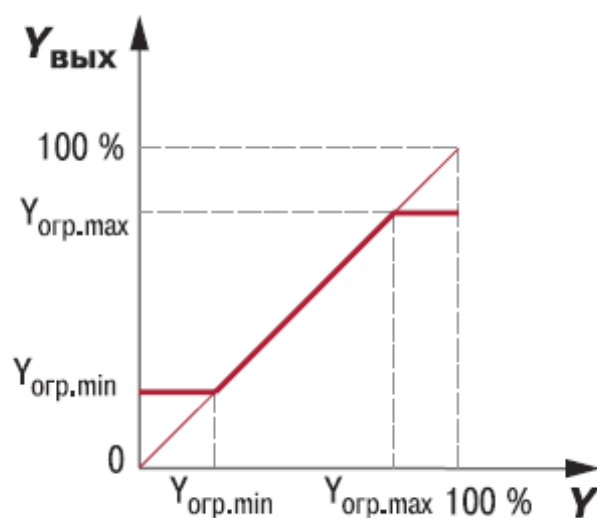


Рис. 3.60. Ограничение управляющего сигнала
«ПИД»регулятора

Зона накопления интеграла

Если рассогласование E долго сохраняет знак, величина интегральной составляющей становится очень большой (эффект интегрального насыщения), что может привести к перерегулированию (рис. 3.61).

Для устранения влияния этого эффекта задают зону накопления интеграла, в пределах которой регулятор вычисляет интегральную составляющую. За пределами этой зоны, где интегральная сумма слишком велика, для формирования управляющего сигнала используется только пропорциональная составляющая. В зависимости от режима работы регулятора (нагреватель или холодильник) эта зона расположена выше или ниже уставки. Если регулятор управляет задвижкой без датчика положения, значение этого параметра не влияет на работу регулятора.

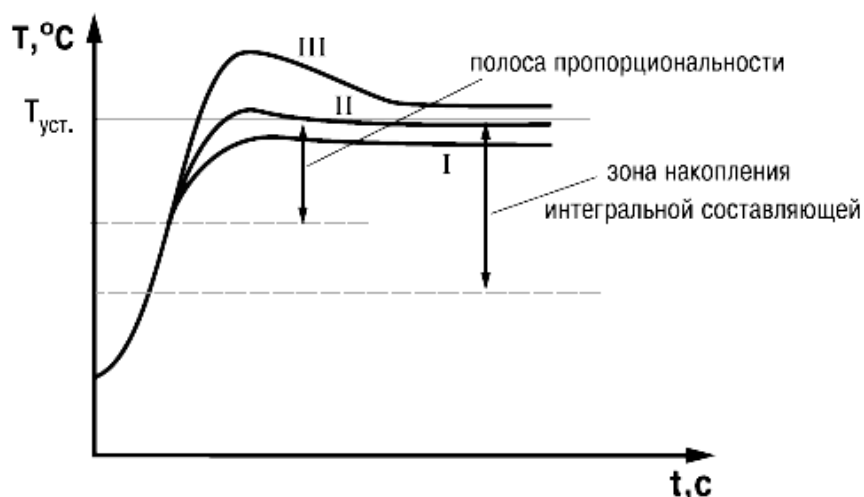


Рис. 3.61. Возможные режимы работы «ПИ» регулятора:
 I – «П» регулятор; II – «ПИ» регулятор с ограничением накопления интегральной составляющей; III – «ПИ» регулятор без ограничения интегральной составляющей

Ограничение скорости выхода на уставку

Ограничение скорости выхода контролируемой величины на заданное значение используется для предотвращения перерегулирования при запуске системы (кривая I на рис. 3.62). Фиксированное значение уставки заменяют на «плавающее», которое постепенно приближают к значению $T_{уст}$ (кривая II). Приближение происходит сначала со скоростью $v_{уст}$, затем скорость постепенно уменьшается. Рекомендуемое значение $v_{уст}$ определяется прибором на автонастройке и обеспечивает первоначальную величину перерегулирования (первого «выбега») не более Δ .

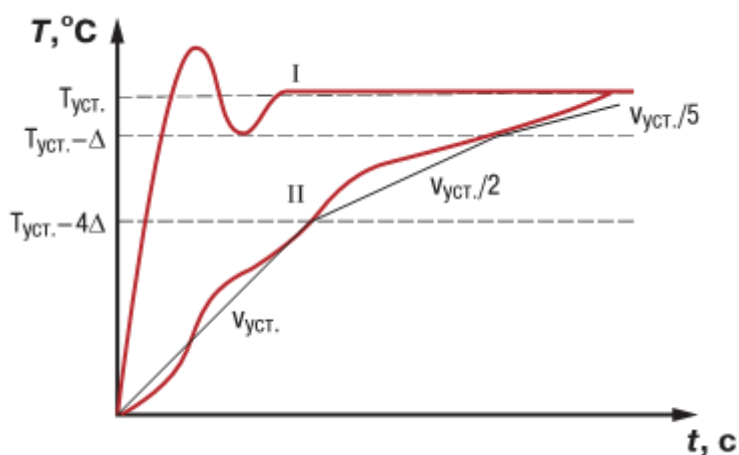


Рис. 3.62. Ограничения скорости выхода на уставку

При использовании скорости выхода на уставку возрастает время выхода на рабочий режим. Поэтому если задержка приводит к неудовлетворительным результатам, нужно увеличить $v_{уст}$ или отключить действие параметра.

Период управляющих импульсов

При использовании «ПИД» регулятора с выходным устройством ключевого типа (электромагнитное реле, транзисторная или симисторная оптопара) необходимо устанавливать период управляющих импульсов. Чем выше частота управляющих импульсов, т. е. меньше период $T_{сл}$, тем быстрее реакция регулятора на внешние возмущения.

В идеале частота импульсов управления должна совпадать с частотой опроса датчика. Однако если при использовании на выходе «ПИД» регулятора электромагнитного реле или пускателя установить слишком большую частоту срабатывания, то частые переключения приведут к быстрому износу силовых контактов. Поэтому значения $T_{сл}$ приходится увеличивать, но необходимо понимать, что качество регулирования при этом может ухудшиться.

При использовании в качестве выходных устройств электронных ключей (транзисторных или симисторных оптопар) не возникает проблемы износа контактов и значение $T_{сл}$ можно установить равным периоду опроса датчика (например, для ТРМ 101 – 1–2 с).

Автонастройка позволяет определить значение $T_{сл}$, которое не будет оказывать отрицательного влияния на работу системы.

Управление различными исполнительными устройствами

Для поддержания заданного значения регулируемого параметра при работе ЛУ в режиме «Регулятор» можно использовать разные типы исполнительных устройств, но все они могут быть разделены на две группы – нагреватели и холодильники.

Нагревателем условно называют устройство, включение которого должно приводить к увеличению значения измеряемого параметра.

Холодильником называется устройство, включение которого должно приводить к уменьшению значения измеряемого параметра.

Кроме того, в некоторых «ПИД» регуляторах существует специальный режим для управления устройствами типа «задвижка». Задвижка, в свою очередь, тоже может управлять либо нагревателем, либо холодильником.

Нагреватель («обратное» управление)

Управление процессом с помощью устройств типа «нагреватель» называется также «обратным», так как с увеличением значения регулируемого параметра уменьшается значение выходного сигнала Y . Регулятор при «обратном» управлении включается при текущих значениях T , меньших уставки $T_{уст}$ (при положительных отклонениях E), и отключается при $T > T_{уст}$, что отражено на рис. 3.63.

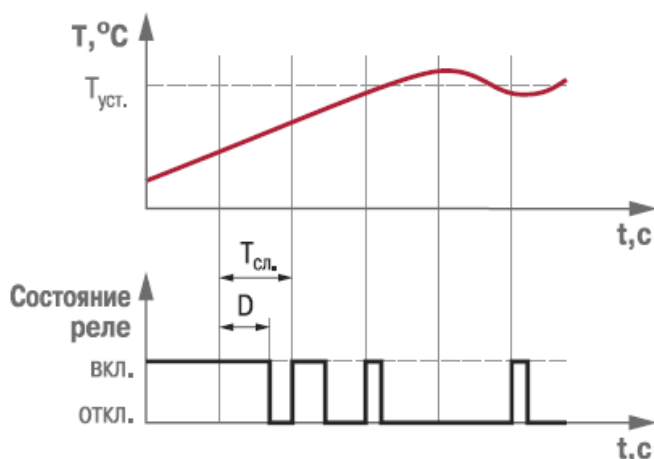


Рис. 3.63. Выходной сигнал регулятора и временная диаграмма выходного реле при ШИМ управлении нагревателем

Холодильник («прямое» управление)

Управление процессом с помощью устройств типа «холодильник» называют также «прямым», так как с увеличением значения регулируемого параметра увеличивается значение выходного сигнала Y . Регулятор при «прямом» управлении включается при текущих значениях T , больших уставки $T_{уст}$ (при отрицательных отклонениях E), и отключается при $T < T_{уст}$.

Одновременное управление нагревателем и холодильником

Для поддержания регулируемой величины регулятор может одновременно управлять двумя исполнительными устройствами – нагревателем и холодильником (рис. 3.64). Если в момент включения регулятора значение регулируемого параметра меньше уставки, регулятор включает нагреватель и использует это устройство до тех пор, пока величина выходного сигнала Y не поменяет знак на противоположный. После этого регулятор включает холодильник.

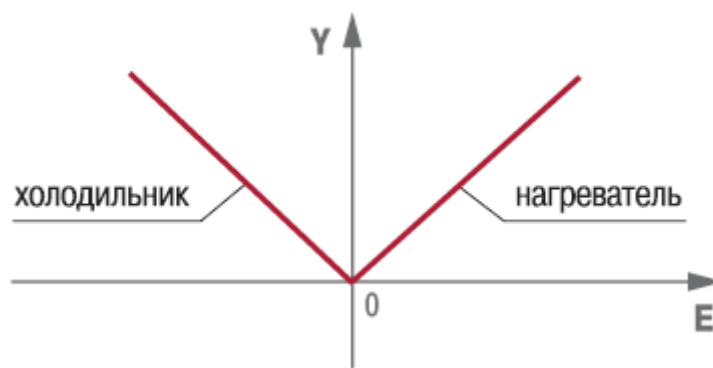


Рис. 3.64. Одновременное управление нагревателем и холодильником

Точная настройка

Современные регуляторы способны самонастраиваться. Для точной автонастройки необходима предварительная информация о системе, которую получают в ходе предварительной настройки.

В процессе точной автонастройки регулятор возбуждает колебания входной величины вокруг уставки с амплитудой Δ . Значение Δ должен задать пользователь, исходя из свойств системы. Рекомендуется задавать значение Δ , которое прибор определяет при предварительной настройке. В любом случае значение Δ должно быть не меньше амплитуды колебаний A , вычисленной в процессе предварительной настройки.

Пользователь должен задать также отношение $\tau_d/\tau_{ин}$. Чем меньше значение этого параметра, тем меньше будет влияние дифференциальной составляющей «ПИД» регулятора на процесс регулирования. Значение $\tau_d/\tau_{ин}$, установленное на заводе-изготовителе по умолчанию, обычно является удовлетворительным.

Точная автонастройка производится методом последовательного приближения значений параметров регулятора к оптимальным. Прибор запускает синусоидальные колебания (рис. 3.65) и пересчитывает коэффициенты «ПИД» регулятора X_p , $\tau_{ин}$, τ_d до тех пор, пока характеристики практически возбуждаемых колебаний не будут соответствовать расчетным.

Выходные устройства

Выходные устройства (ВУ) предназначены для передачи выходного управляющего сигнала на исполнительные механизмы либо передачи данных на регистрирующее устройство.

К выходным устройствам ключевого типа относятся: электромагнитное реле, транзисторная оптопара, симисторная оптопара.

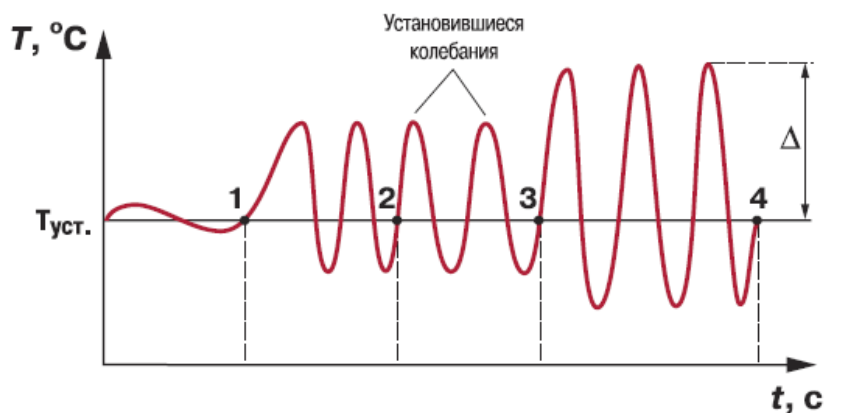


Рис. 3.65. Настройка регулятора методом последовательных приближений:
1 — начало точной настройки; 2 — возбуждение колебаний с первоначальными значениями X_p , τ_i , τ_d ; 3 — пересчет коэффициентов «ПИД» регулятора (колебания с рассчитанными X_p , τ_i , τ_d); 4 — окончание точной настройки (запись новых X_p , τ_i , τ_d)

Выходное устройство ключевого типа используется для управления (включения/выключения) нагрузкой либо непосредственно, либо через более мощные управляющие элементы, такие как пускатели, твердотельные реле, тиристоры или симисторы.

Транзисторная оптопара и оптосимистор имеют гальваническую развязку со схемой прибора. Транзисторная оптопара применяется, как правило, для управления низковольтным реле (до 30 В). Схема включения показана на рис. 3.66. Во избежание выхода из строя транзистора из-за большого тока самоиндукции параллельно обмотке реле P1 необходимо устанавливать диод VD1, рассчитанный на напряжение 100 В и ток 1 А.

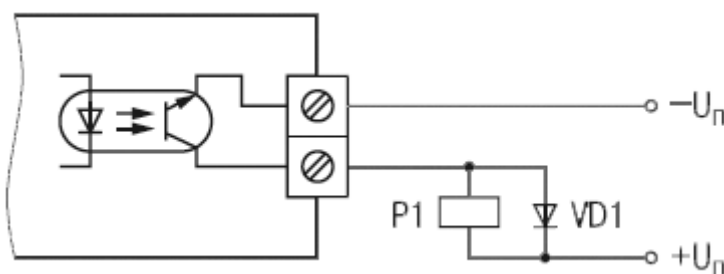


Рис. 3.66. Схема включения транзисторной оптопары

Оптосимистор включается в цепь управления мощного симистора через ограничивающий резистор $R1$ по схеме, приведенной на рис. 3.67. Значение сопротивления резистора определяет величину тока управления симистора.

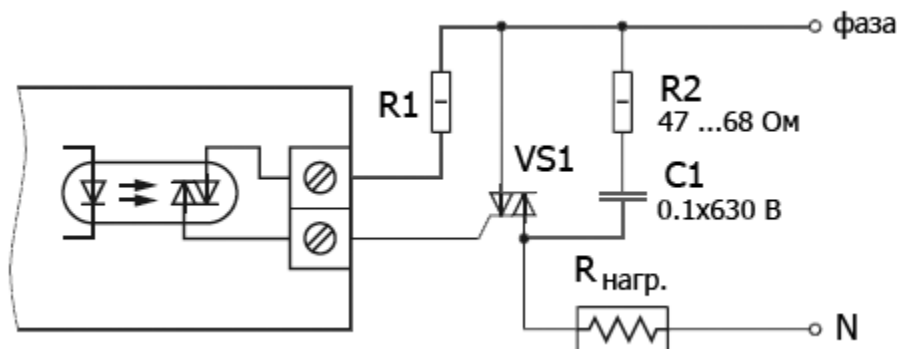


Рис. 3.67. Схема включения оптосимистора

Оптосимистор может также управлять парой встречно-параллельно включенных тиристоров $VS1$ и $VS2$ (рис. 3.68). Для предотвращения пробоя тиристоров из-за высоковольтных скачков напряжения в сети к их выводам рекомендуется подключать фильтрующую RC -цепочку ($R2$, $C1$). Оптосимистор имеет встроенное устройство перехода через ноль, поэтому обеспечивает полное открытие подключаемых тиристоров без применения дополнительных устройств.

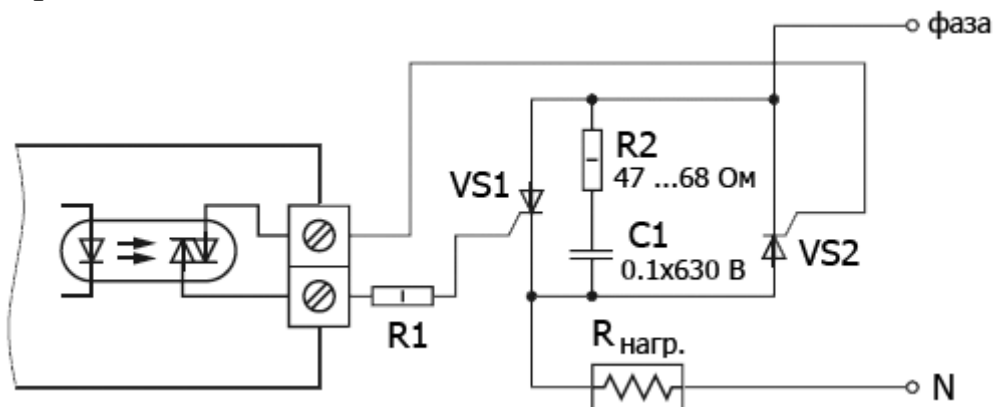


Рис. 3.68. Схема управления двумя тиристорами

Выходное устройство аналогового типа – это, как правило, цифроаналоговый преобразователь, который формирует токовую петлю 4–20 мА на активной нагрузке 0–1000 Ом. Оно имеет гальваническую развязку от схемы прибора.

Расчет источника питания аналогового выхода

Для работы аналогового выхода используется внешний источник питания постоянного тока, номинальное значение напряжения U_{π} которого рассчитывается следующим образом (рис. 3.69, а):

$$U_{\pi \min} < U_{\pi} < U_{\pi \max};$$

$$U_{\pi \min} = 7,5 \text{ В} + 0,02 \text{ А} \cdot R_{\text{н}};$$

$$U_{\pi \max} = U_{\pi \min} + 7,5 \text{ В},$$

где $U_{\pi \min}$ и $U_{\pi \max}$ – минимальное и максимальное допустимые напряжения питания, В; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки цифроаналогового преобразователя (ЦАП), Ом.

Если по какой-либо причине напряжение источника питания ЦАП, находящегося в распоряжении пользователя, превышает расчетное значение $U_{\pi \max}$, то последовательно с нагрузкой необходимо включать ограничительный резистор (см. рис. 3.69, б), сопротивление которого $R_{\text{огр}}$ рассчитывается по формулам

$$R_{\text{огр} \min} < R_{\text{огр. ном}} < R_{\text{огр} \max}; \quad R_{\text{огр} \min} = \frac{U_{\pi} - U_{\pi \max}}{I_{\text{цап} \max}} 10^3,$$

где $R_{\text{огр. ном}}$, $R_{\text{огр} \min}$, $R_{\text{огр} \max}$ – номинальное, минимальное и максимальное допускаемые значения сопротивления ограничительного резистора, Ом; I – выходной ток цифроаналогового преобразователя, мА.

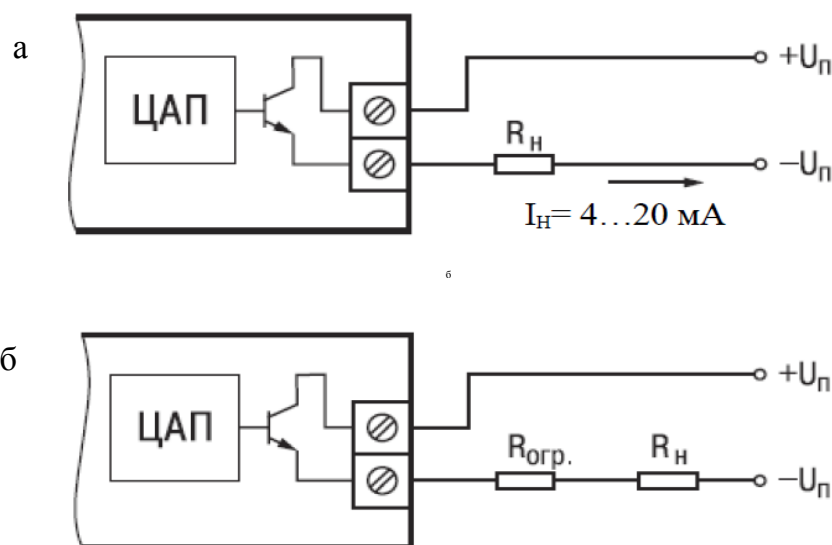


Рис. 3.69. Варианты защиты (а, б) цифроаналогового преобразователя

Автонастройка «ПИД» регулятора

Автоматическая настройка (автонастройка) предназначена для оптимальной настройки системы регулирования непосредственно на объекте.

Автонастройка в приборах может включать два этапа – предварительную настройку регулятора; точную настройку регулятора, или настройку в процессе эксплуатации системы на объекте.

При предварительной настройке прибор работает как двухпозиционный регулятор. При запуске системы первый пик амплитуды пропускается, а для первого целевого колебания (между точками 1 и 2 на рис. 3.70) прибор определяет амплитуду A и период этого колебания как сумму $t_n + t_o$.

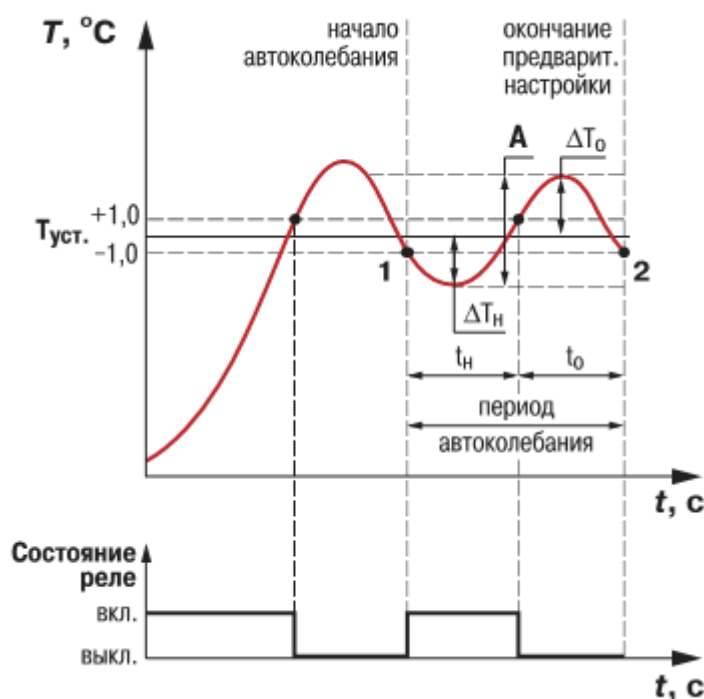


Рис. 3.70. Процесс предварительной настройки «ПИД» регулятора

Из полученных значений амплитуды и периода автоколебания прибор вычисляет приближенные значения коэффициентов «ПИД» регулятора (X_p, τ_n, τ_d) для данной системы. Предварительная настройка позволяет обеспечить работоспособность системы регулирования при найденных значениях параметров. Кроме того, в процессе предварительной настройки прибор определяет постоянную времени входного сглаживающего фильтра τ_ϕ , период следования управляющих импульсов ШИМ $T_{\text{сш}}$ и оптимальную скорость выхода

на уставку $v_{уст}$. Прибор также определяет амплитуду Δ , с которой будут совершаться колебания при проведении точной автонастройки.

3.9.5. Позиционные регуляторы давления

В холодильных установках для регулирования давления обычно применяют позиционные регулирующие устройства – реле давления. Это электромеханические приборы с контактным выходом, которые обеспечивают коммутацию цепей питания магнитных пускателей, электроприводов компрессоров и насосов. Конструктивно реле давления выпускается в одно- и двухдатчиковом исполнении, причем последнее обычно используется для защиты компрессора от повышенного давления нагнетания и пониженного давления всасывания.

Выходной сигнал реле изменяется скачкообразно при достижении входной величины, т. е. давления определенного значения. За выходной сигнал можно принять напряжение или ток, который коммутируется контактами реле. На рис. 3.71 приведена статическая характеристика двухпозиционного реле.

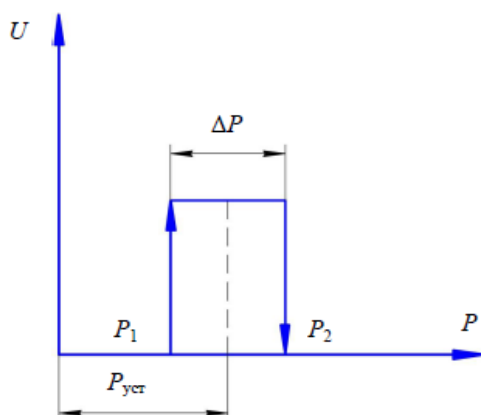


Рис. 3.71. Характеристика двухпозиционного реле

Работа реле давления характеризуется тем, что при непрерывном изменении давления до какого-то значения $P < P_2$ выходная величина не изменяется, т. е. не меняется положение контактов, а при $P \geq P_2$ происходит размыкание цепи питания магнитного пускателя электропривода. При уменьшении давления до значения $P \leq P_1$ происходит замыкание цепи питания магнитного пускателя.

Величина $P_{уст}$ называется уставкой реле давления, а ΔP – дифференциалом реле. В некоторых типах реле предусмотрено измене-

ние параметра ΔP специальным узлом настройки дифференциала. Отношение $K = P_1/P_2$ называется коэффициентом возврата реле, который определяет его дифференциал. На рис. 3.72, а дана схема конструкции реле давления с регулируемым дифференциалом [7]. Уставка необходимого давления производится с помощью винта 1, при котором должно происходить перемещение контактов. Этот винт вращает шпindel и зажимает пружину. Далее уставляется дифференциал давления вращающейся планкой 6, которая устанавливает переключение контактов 1, 2, 3. При отсутствии давления в системе у реле замкнуты контакты 1 и 2. По мере увеличения давления сильфон 3 будет сжиматься и давить на пружину 2; когда давление достигнет уставки, основной рычаг 5 осуществит скачкообразно переключение контактов, разомкнутся контакты 1, 2 и замкнутся контакты 2, 3. Обратное переключение произойдет, когда давление уменьшится до значения уставки минус дифференциал.

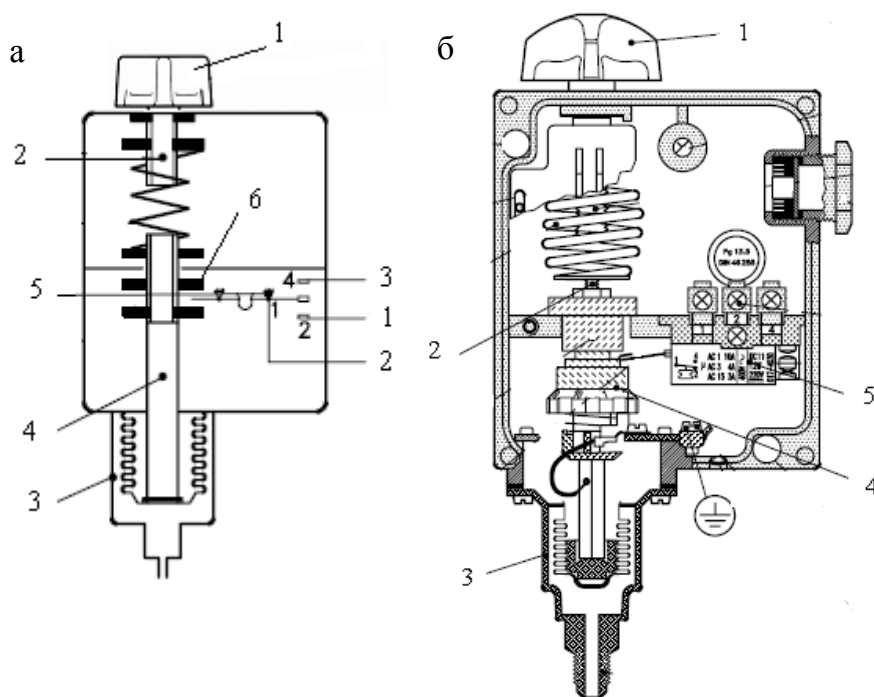


Рис. 3.72. Конструкция реле давления с регулируемым дифференциалом:
а – конструктивная схема; б – расположение элементов прибора;
1 – винт основной шкалы; 2 – пружина; 3 – сильфон; 4 – шайбы; 5 – рычаг;
6 – вращающаяся планка

На рис. 3.72 приведены конструкция и кинематическая схема однодатчикового реле давления типа РТ фирмы Danfoss [11] с нерегулируемым дифференциалом. Для этого реле характерно наличие

только одного настроечного узла в виде уставки давления. Винтом изменяется жесткость пружины, что и определяет значение уставки. Сила давления контролируемой среды воздействует на сильфон, дно которого жестко связано со штоком. Как только сила давления будет в состоянии преодолеть жесткость пружины, шток будет перемещаться вверх. На штоке имеются шайбы из изоляционного материала, которые при движении штока через рычаг обеспечивают переключение контактной группы. Шаг между шайбами определяет нерегулируемый дифференциал реле давления.

В настоящее время фирма «ОРЛЭКС» [12] выпускает реле давления модификации ДЕМ, которые имеют следующие технические характеристики: ДЕМ 102-1-01-1: $P_{уст} = -0,07 \dots + 0,4$ МПа; $\Delta = 0,04 \dots 0,25$ регулируемый или $0,03$ – нерегулируемый; ДЕМ 102-2-01-2: $P_{уст} = -0,03 \dots + 0,4$ МПа; $\Delta = 0,04$ нерегулируемый. Эти однопозиционные реле давления предназначены для контроля и двухпозиционного регулирования потоков жидких и газообразных сред в холодильных установках. Контролируемые среды: хладоны, воздух, масла и другие среды, неагрессивные к медным сплавам, стали, фторопласту, серебряным припоям. Для приборов ДЕМ 102-1-01А и ДЕМ 102-2-05А контролируемой средой может быть аммиак.

Датчики-реле давления, сдвоенные, типа ДЕМ 301 предназначены для контроля и регулирования давления газообразных и жидких сред в стационарных холодильных установках. Контролируемые среды: воздух, масла, хладоны и другие среды, неагрессивные к медным сплавам. Прибор имеет датчик низкого давления (ДНД) и датчик высокого давления (ДВД), воздействующие на одно переключающее устройство. Шкала уставок ДНД имеет числовые промежуточные отметки, а ДВД – фиксированную уставку. Чувствительным элементом датчиков реле давления является сильфон.

Пределы уставок и дифференциалы, МПа:

- ДНД: от $-0,7$ до $+ 0,4$ МПа; $\Delta = 0,04 \dots 0,25$ регулируемый;
- ДВД: от $0,6$ до $3,0$ МПа; $\Delta = 0,25$ нерегулируемый.

Датчики-реле разности давлений типа ДЕМ202 предназначены для контроля и двухпозиционного регулирования разности давлений жидких и газообразных сред в холодильных установках. Контролируемые среды: хладоны, воздух, масла – для ДЕМ202; аммиак – для ДЕМ202А.

Пределы уставок и дифференциала, например, для ДЕМ 202-1-01-2:
 $P_{уст} = 0,02 \dots 0,6$ МПа; $\Delta = 0,05$ нерегулируемый. Коммутируемая мощность для вышеперечисленных реле давления составляет 60 Вт.

3.9.6. Автоматические регуляторы температуры позиционного действия

По виду статической характеристики эти регуляторы могут быть позиционного и непрерывного действия. К регуляторам позиционного действия можно отнести реле температуры, которые по принципу действия подразделяются на манометрические, dilatометрические и электронные. Чувствительным элементом манометрического реле температуры является термочувствительный баллон с легкокипящим наполнителем. Один из вариантов такого реле приведен на рис. 3.73, на котором показаны соответственно кинематическая схема и конструктивное расположение элементов прибора модели RT фирмы Danfoss [11].

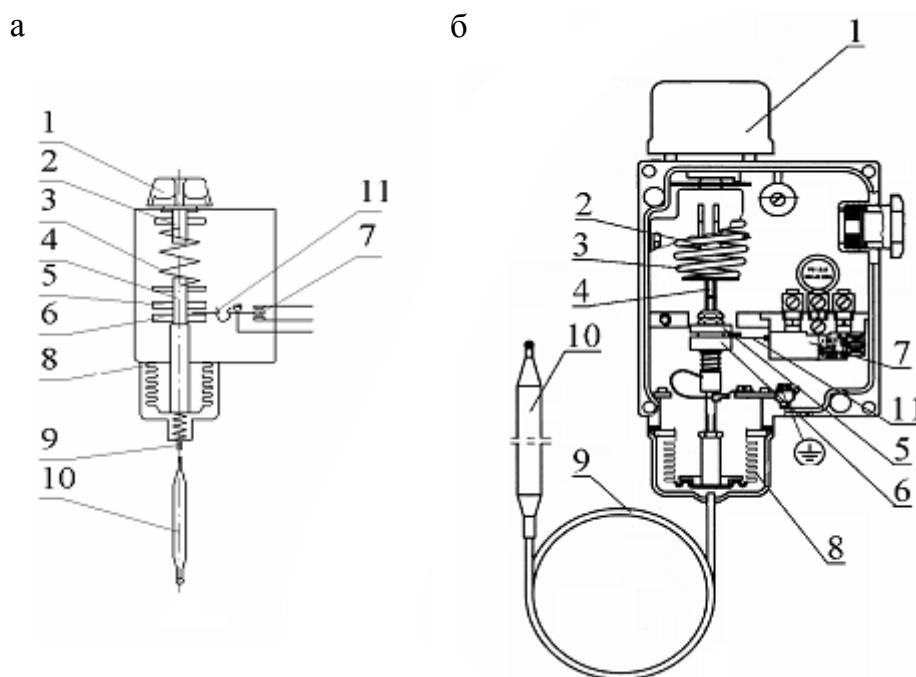


Рис. 3.73. Вариант манометрического реле температуры:

а – кинематическая схема; б – расположение элементов прибора;

1 – ручка настройки температуры; 2 – шток регулировки температуры;
 3 – основная пружина; 4 – основной шток; 5, 6 – приводные шайбы настройки дифференциала; 7 – контактная система; 8 – сильфон; 9 – капиллярная трубка;
 10 – термочувствительный баллон; 11 – контактный рычаг

Основная пружина 3 служит для настройки реле на требуемое значение температуры. При погружении термобаллона 10 в среду, в которой регулируется температура, в баллоне будет изменяться давление, которое через капиллярную трубку воздействует на сильфон, и последний будет деформироваться. Ручка настройки 1 через основную пружину 3 уравнивает давление на сильфон. Когда температура вокруг термобаллона повышается, сильфон сжимается и основной шток 4 перемещается вверх до тех пор, пока давление на сильфон и сила сжатия пружины не уравниваются. Основной шток снабжен приводными шайбами 5, 6 настройки дифференциала реле. Эти шайбы при перемещении штока могут прижимать или отжимать контакты контактной группы 7. Дифференциал реле будет определяться разностью между температурой замыкания и размыкания контактов.

Дифференциальное реле температуры (рис. 3.74) имеет два термобаллона, в зависимости от разности температур этих термобаллонов будет различной степень сжатия сильфонов, что обеспечивает через соответствующий шток включение и выключение электрической цепи управления контактной группой.

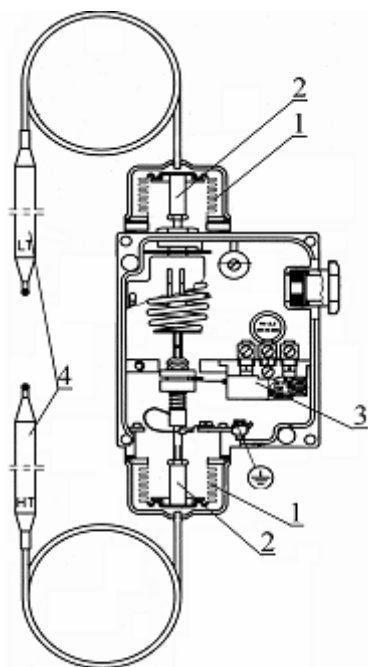


Рис. 3.74. Дифференциальное реле температуры:
1 – сильфон; 2 – шток; 3 – реле; 4 – термобаллон

Данный тип регуляторов используется в случаях, когда необходимо поддерживать заданное значение разности температур. Температура одного из термобаллонов служит опорным значением, в то время как температура другого используется в качестве информации для формирования управляющего воздействия. Регулируемой величиной при этом является разность температур.

Принцип действия dilatометрических регуляторов основан на разности линейного расширения твердых тел – трубки и стержня, расположенного внутри трубки. При изменении температуры окружающей среды изменяется длина стержня, он коммутирует через микровыключатель цепь питания регулирующего устройства.

Работа электронных позиционных регуляторов температуры основана на свойствах уравновешенного и неуравновешенного моста. В одно из плеч мостовой схемы включается термометр сопротивления, а в другое плечо – задатчик требуемой температуры. В измерительную диагональ мостовой схемы включается релейный контактный или бесконтактный (триггер) усилитель, который и обеспечивает коммутацию выходных цепей регулятора. Уставка и дифференциал регулятора определяются параметрами релейного элемента.

Широкий ассортимент позиционных регуляторов температуры выпускается фирмой «ОРЛЭКС» [12] в г. Орле. В табл. 3.2 приводятся их некоторые типы с основными техническими характеристиками, подходящими к температурным режимам холодильных систем.

Таблица 3.2

Характеристики регуляторов температуры

Тип регулятора	Вид чувствительного элемента	Значение пределов уставки температуры	Дифференциал регулятора
ТАМ102-1-02	Термобаллон	– 20....+ 10 °С	2,5...6° (регулируемый)
ТАМ103-01	Термобаллон	– 50....+ 50 °С	3...6° (нерегулируемый)
ТАМ113-2	Термобаллон	– 10....+ 10 °С	≤ 4° (нерегулируемый)
ТАД101-1	Дилатометрический	– 10....+ 90 °С	≤ 11° (регулируемый)
Т419-2М-02	Электронный, датчики ТСМ или ТСП	– 25....+ 25 °С	1...10° (регулируемый)
ТРЭ106	Электронный, термосопротивление ТМ	– 50....0 °С – 10....+ 40 °С	0,5...10° (регулируемый)

Наряду с позиционными регуляторами в холодильных системах применяются и пропорциональные регуляторы температуры, т. е. регуляторы непрерывного действия, у которых регулирующий орган может занимать любое положение в пределах 0–100 % хода регулирующего органа (ХРО).

3.9.7. Пропорциональные регуляторы температуры

Регуляторы с пропорциональным законом регулирования подразделяются на регуляторы непрерывного действия и релейно-импульсные регуляторы, у которых регулирующее воздействие формируется в виде серии импульсов.

Рассмотрим работу пропорционального регулятора температуры непрерывного действия на примере терморегулирующего вентиля (ТРВ), схема которого приведена на рис. 3.75. Терморегулирующий вентиль предназначен для регулирования подачи хладагента в испаритель в зависимости от перегрева паров хладагента на выходе из испарителя. В каждый момент времени ТРВ должен подавать в испаритель такое количество хладагента, которое может полностью испариться. Кроме того, пары хладагента при выходе из испарителя должны иметь температуру несколько выше температуры кипения, что является гарантией отсутствия жидкой фазы хладагента в потоке, покидающем испаритель, и предотвращает возможность работы компрессора с «влажным ходом».

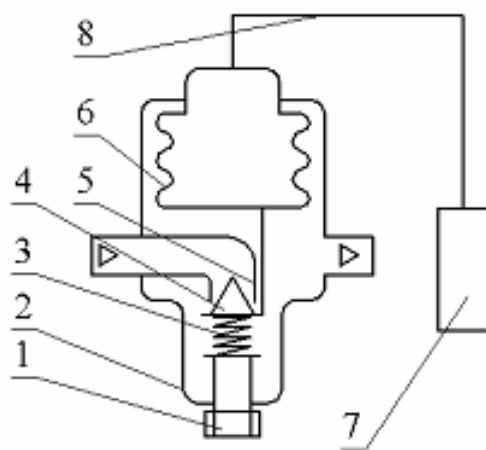


Рис. 3.75. Функциональная схема терморегулирующего вентиля:
1 – винт регулировки величины перегрева; 2 – корпус регулятора; 3 – пружина;
4 – игла клапана; 5 – дроссельное отверстие; 6 – сильфон;
7 – термочувствительный баллон; 8 – капиллярная трубка

Принцип работы ТРВ заключается в следующем. На сильфон 6 действуют сила давления паров хладагента в испарителе и жесткость пружины 3, поджатой винтом уставки перегрева 1. Эти силы стремятся закрыть ТРВ, но, с другой стороны, давление в термобаллоне 7, который укреплен на трубопроводе, выходящем из испарителя, передаваемое через капиллярную трубку 8 во внутреннюю полость сильфона, стремится открыть ТРВ. Давление в термобаллоне 7 определяется температурой перегрева паров хладагента.

Разность давлений, которая определяет перегрев, между давлением в испарителе и давлением в термобаллоне 7, передаваемым в полость сильфона и позволяющим открыть ТРВ, выставляется с помощью винта уставки 1, положение которого изменяет жесткость пружины 3. Терморегулирующий клапан открывается, когда перегрев выше заданного значения, и закрывается, когда перегрев уменьшается.

Дадим количественную оценку параметра настройки ТРВ как пропорционального регулятора. Уравнение равновесия сил, действующих на сильфон, запишется в виде

$$S_c \Delta P (\Delta t^\circ) = (C_{\text{пр}} + C_c) \Delta \ell, \quad (3.20)$$

где S_c – площадь внутренней полости сильфона; $\Delta P (\Delta t^\circ)$ – приращение давления в термобаллоне в зависимости от приращения температуры хладагента Δt в испарителе; $C_{\text{пр}}$, C_c – жесткость поджимающей пружины и сильфона, соответственно; $\Delta \ell$ – ход иглы клапана ТРВ в зависимости от перегрева.

Считаем, что в области малых изменений перегрева площадь внутренней полости сильфона и его жесткость остаются постоянными. Поделим левую и правую части уравнения на $P_0 \ell_0$, где P_0, ℓ_0 – начальные значения давления кипения в испарителе и начальное положение хода иглы клапана ТРВ. Тогда уравнение (3.20) запишется в виде

$$S_c \Delta P / P_0 \ell_0 = (C_{\text{пр}} + C_c) \Delta \ell / P_0 \ell_0, \quad (3.21)$$

где $\Delta P / P_0 = \varphi$ – относительное изменение возмущающего воздействия; $\Delta \ell / \ell_0 = \mu$ – относительное значение регулирующего воздействия.

Уравнение (3.21) можно переписать в виде

$$\mu = ((S_c/l_0) / (C_{\text{пр}} + C_c) P_0) \varphi = K_p \varphi.$$

Из последнего выражения видно, что коэффициент передачи регулятора K_p определяется жесткостью пружины $C_{\text{пр}}$, так как все остальные величины, а именно S_c , P_0 , l_0 , C_c , являются постоянными. Итак, ТРВ относится к группе регуляторов с пропорциональным законом регулирования и одним параметром настройки, значение которого выставляется винтом уставки. Терморегулирующий клапан относится к группе регуляторов аппаратного типа, так как он реализует только функции регулирования и защиты.

3.9.8. Автоматические регуляторы уровня

Приборы предназначены для регулирования уровня жидкостей в емкостях холодильных установок. По виду статической характеристики эти регуляторы подразделяются на позиционные и непрерывные. Конструктивно они выполняются в виде регуляторов прямого и косвенного действия.

Приборы для измерения уровня жидкости, которые были рассмотрены в разд. 3.7, можно использовать и для двухпозиционного регулирования уровня, если контакты выходного реле этих приборов будут коммутировать цепь питания исполнительных механизмов на линии подачи жидкости. При достижении уровня нижнего значения исполнительный механизм (например, соленоидный клапан) открывает проходное сечение и емкость заполняется; при достижении уровня верхнего значения исполнительный механизм закрывается и подача жидкости прекращается. Таким образом, сигнализация об уровне жидкости одновременно сопровождается его регулированием. К такой группе приборов можно отнести ранее рассмотренные сигнализаторы и регуляторы уровня типа ESP-50, ЭСУ-3 и ПРУ-5.

Фирмой Danfoss выпускается электронный регулятор уровня модели 38E [11] (рис. 3.76).

Перемещение поплавка вместе с поверхностью уровня хладагента приводит к соответствующему перемещению управляющей трубки, жестко связанной с поплавком. Таким образом, при подъеме или опускании поплавка в зависимости от колебаний уровня хлад-

агента управляющая трубка поднимается или опускается в управляющей катушке индуктивности, что приводит к изменению величины и фазы тока, протекающего в этой катушке, так как ее обмотки включены по дифференциально-трансформаторной схеме. Величина тока, а значит, и напряжения с выхода катушки усиливаются усилителем и преобразуются в серии импульсов, которые поступают на электроклапан (на схеме не показан). При номинальном значении уровня хладагента поплавков и управляющая трубка занимают нейтральное положение, формирование импульсов прекращается, клапан подачи хладагента закрывается.

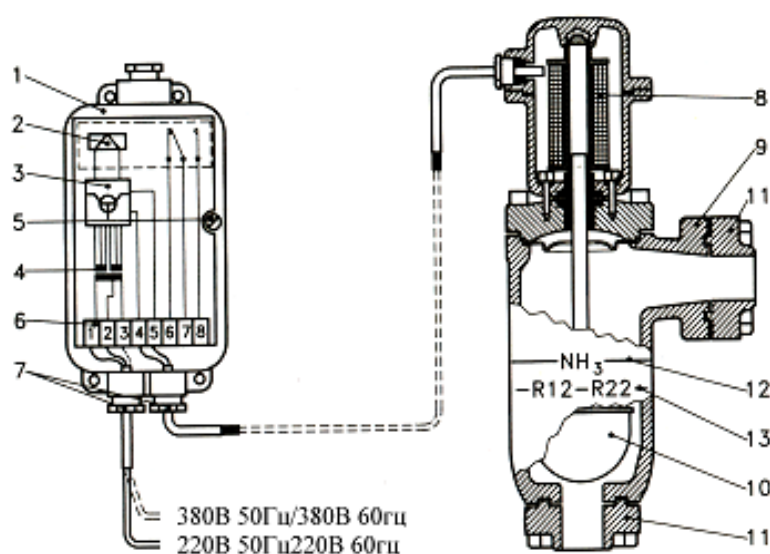


Рис. 3.76. Электронный регулятор уровня жидкого хладагента:
 1 – корпус усилителя; 2 – реле; 3 – усилитель с трансформатором 4 и заземлением; 5, 6 – подсоединительные клеммы; 7 – подключение электрокабелей; 8 – управляющая катушка индуктивности; 9 – поплавковая камера; 10 – поплавок с управляющей трубкой; 11 – подсоединительный фланец; 12 – средний уровень для аммиака ($R717$); 13 – средний уровень для $R12$ и $R22$

Расстояние между верхним и нижним положениями управляющего поплавка регулируется. Максимальная величина этого расстояния составляет 40 мм. Если необходимо иметь большее расстояние, то предусматриваются два регулятора уровня. Кроме того, выходное реле регулятора имеет контактную группу, позволяющую включать в цепь сигнал, указывающий на переполнение или недопустимое опорожнение контролируемой емкости.

Фирмой Danfoss выпускаются также температурные регуляторы уровня модели TEVA (рис. 3.77).

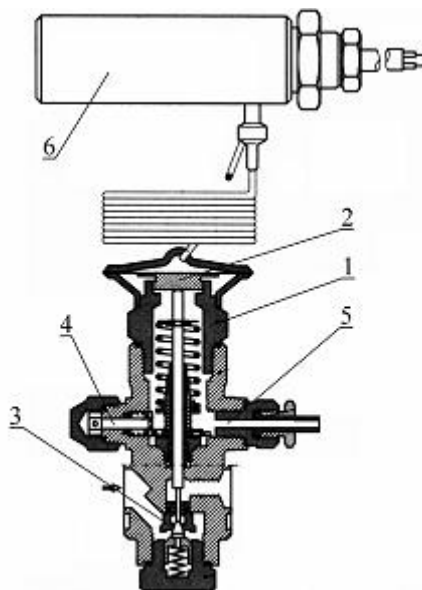


Рис. 3.77. Температурный регулятор уровня:

1 – корпус с мембраной 2 и надмембранной полостью; 3 – патрон со сменным дроссельным отверстием; 4 – регулировочный шток; 5 – патрубок наружной уравнивающей линии; 6 – термобаллон

Регуляторы, в которых поддержание уровня обеспечивается в зависимости от значения температуры, предназначены для управления уровнем хладагента в затопленном испарителе, промежуточном сосуде или отделителе жидкости.

Регулятор включает в себя терморегулирующий вентиль, снабженный термобаллоном, в котором установлен электронагреватель малой мощности. Нагреватель предназначен для формирования сигнала в виде давления паров конденсата легкокипящей жидкости в термобаллоне в надмембранную полость регулятора. Термобаллон приварен к испарителю или ресиверу на высоте желаемого уровня жидкости. Если уровень жидкости расположен ниже термобаллона, то давление в надмембранной полости растет, клапан регулятора открывается и хладагент поступает в испаритель. Когда уровень хладагента достигает термобаллона, тепло от электронагревателя принимает на себя хладагент и регулятор закрывается.

В холодильных установках также широко применяются регуляторы уровня пропорционального действия. На рис. 3.78 приведена схема поплавкового регулятора уровня высокого давления модели SV(H) фирмы Danfoss [11].

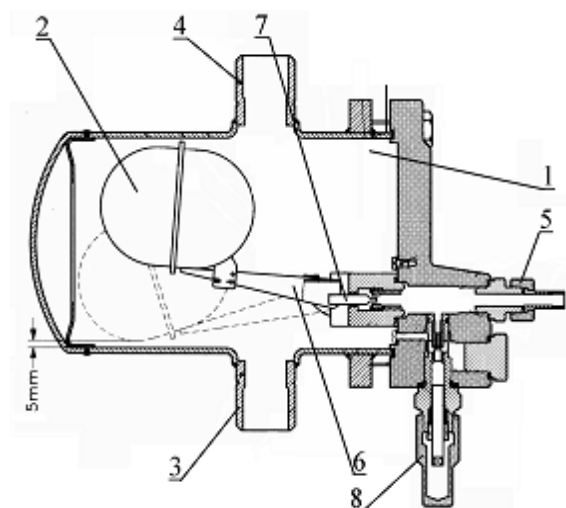


Рис. 3.78. Поплавковый регулятор уровня высокого давления:
 1 – поплавковая камера; 2 – поплавок; 3, 4 – нижний (жидкостной) и верхний (паровой) патрубки, соответственно; 5 – штуцер; 6 – качающееся коромысло; 7 – игла клапана, 8 – устройство ручной регулировки (перезжимной вентиль)

Когда уровень жидкости повышается, поплавок 2 перемещается вверх. При этом игольчатый клапан отходит от седла, освобождая отверстие, и лишняя жидкость стекает вниз. Регуляторы этого типа [SV(H)] используются в качестве регулятора уровня жидкости в конденсаторах или ресиверах.

На рис. 3.79 приведена схема поплавкового регулятора уровня низкого давления.

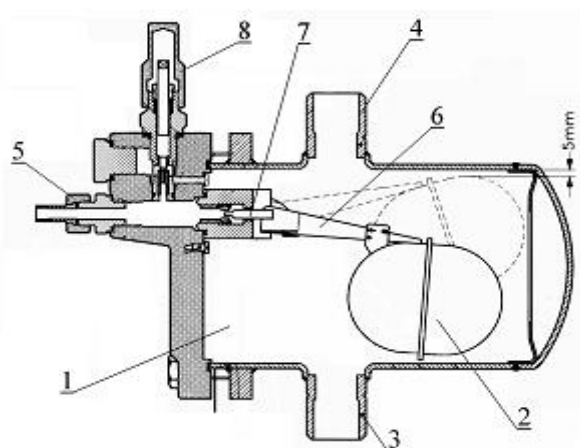


Рис. 3.79. Поплавковый регулятор уровня низкого давления:
 1 – поплавковая камера; 2 – поплавок; 3, 4 – нижний (жидкостной) и верхний (паровой) патрубки, соответственно; 5 – штуцер; 6 – качающееся коромысло; 7 – игла клапана, 8 – устройство ручной регулировки (перезжимной вентиль)

Когда уровень жидкости опускается, поплавков 2 перемещается вниз, игольчатый клапан 7 открывается и уровень поступающей в камеру жидкости повышается. Эти регуляторы типа SV(L) применяются с жидкостными испарителями, где возможны незначительные колебания уровня жидкости. Входная жидкостная линия, присоединяемая к штуцеру 5, должна быть смонтирована таким образом, чтобы получить приемлемые скорости потока жидкости и значения падения давления. Это особенно важно, когда жидкость не переохлаждена, поскольку производительность вентиля значительно снижается при появлении перед входным отверстием пузырьков в жидкости. Пузырьки газа, возникающие при расширении, удаляются через уравнивательную линию.

Рассмотренные выше регуляторы являются регуляторами прямого действия. Для холодильных установок большой холодопроизводительности применяются регуляторы уровня косвенного действия – с сервоприводом. В этом случае описанные выше регуляторы выполняют функции управляющего органа главного привода клапана подачи хладагента.

4. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

В настоящее время при автоматизации технологических процессов активно применяют различные регуляторы на микропроцессорной основе. В качестве примера фирма «ОВЕН» [13] выпускает большой ряд различных измерителей-регуляторов с разными законами регулирования: измеритель двухканальный 2 ТРМ-0; измеритель-регулятор одноканальный ТРМ-1; измеритель-регулятор двухканальный 2 ТРМ-1; измеритель «ПИД» регулятор с дополнительным реле ТРМ 10; контроллеры холодильных машин; блок управления средне- и низкотемпературными холодильными машинами с автоматической оттайкой (ТРМ 974); блок управления средне- и низкотемпературными холодильными машинами с аварийной сигнализацией (ТРМ 961); регулятор скорости вращения вентилятора в зависимости от температуры (ЭРВЕН).

Кроме отечественных, для автоматизации технологических процессов в системах холодоснабжения широко применяются электронные системы управления Adap-Kool фирмы Danfoss [14], в частности контроллеры температуры ЕКС 102, ЕКС 202, ЕКС 204А, ЕКС 301, контроллеры испарителей ЕКС 414 А1, АКС 72А, АКС 114А–116А, АКС 121, контроллеры производительности ЕКС 331Т, электронные системы управления фирмы Джонсон-контрол и др.

В качестве примера рассмотрим работу блока управления средне- и низкотемпературными холодильными машинами с автоматической оттайкой фирмы «ОВЕН». Характеристики данного прибора:

- поддержание заданной температуры в камере;
- режим изменения холодопроизводительности компрессора (режим набора холода);
- два типа оттайки – ТЭНом или горячим паром;
- завершение оттайки;
- отсчет времени между оттайками – по времени или по времени наработки компрессора;
- задание времени для слива конденсата после оттайки;
- защита компрессора от частых повторных запусков;
- защита параметров настройки от несанкционированных изменений.

Блок-схема прибора показана на рис. 4.1, где в качестве чувствительных элементов используется полупроводниковый РТС-сенсор.

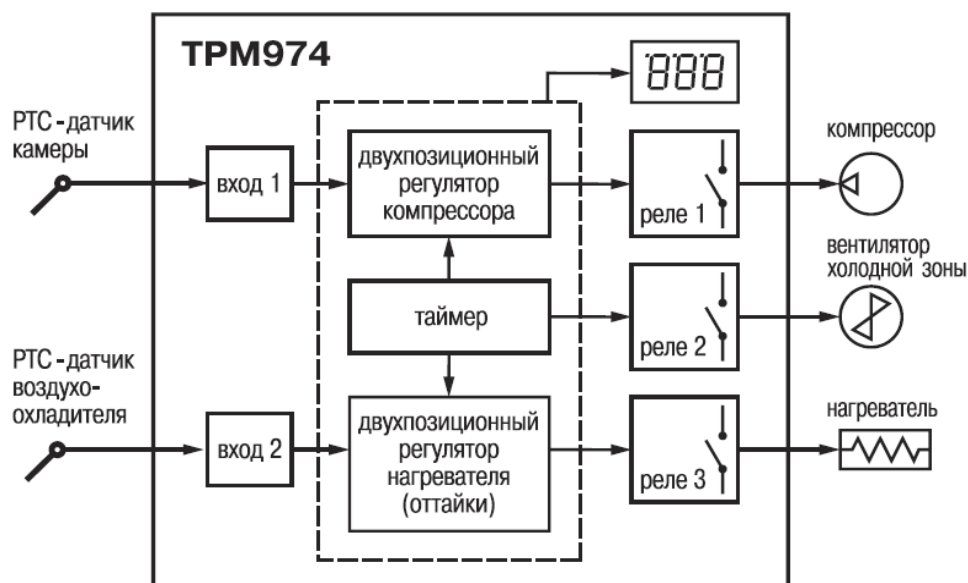


Рис. 4.1. Блок-схема прибора TPM 974

Схема подключений внешних соединений прибора щитового исполнения TPM 974-Щ представлена на рис. 4.2.

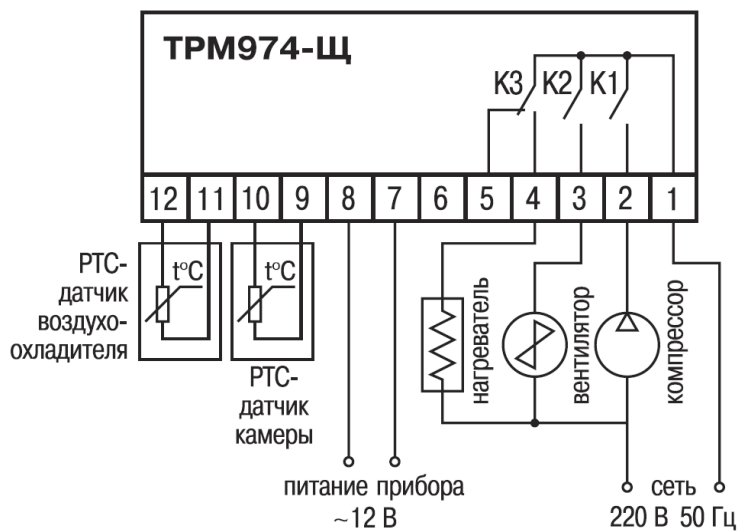


Рис. 4.2. Схема подключений внешних соединений прибора TPM 974-Щ

Примеры работы TPM 974 в режиме термостата приведены на рис. 4.3; пример работы TPM 974 в режиме набора холода представлен на рис. 4.4.

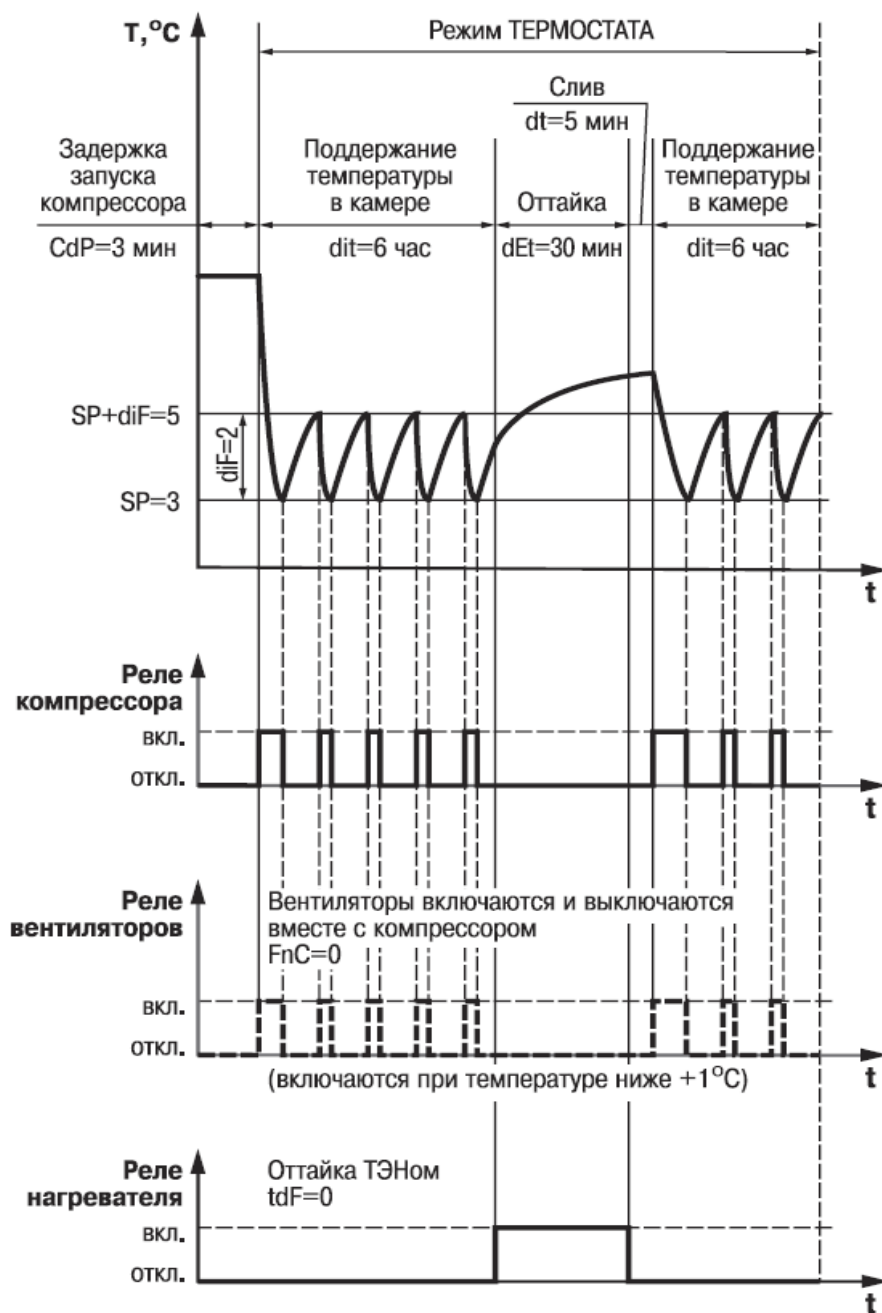


Рис. 4.3. Параметры работы прибора ТРМ 974 в режиме термостата

На рис. 4.3 показаны графики изменения температуры в камере и временная диаграмма работы выходных реле (для значений параметров, установленных заводом-изготовителем по умолчанию); на рис. 4.4 – график изменения температуры в камере и временная диаграмма работы компрессора (для значений параметров, установленных заводом-изготовителем по умолчанию).

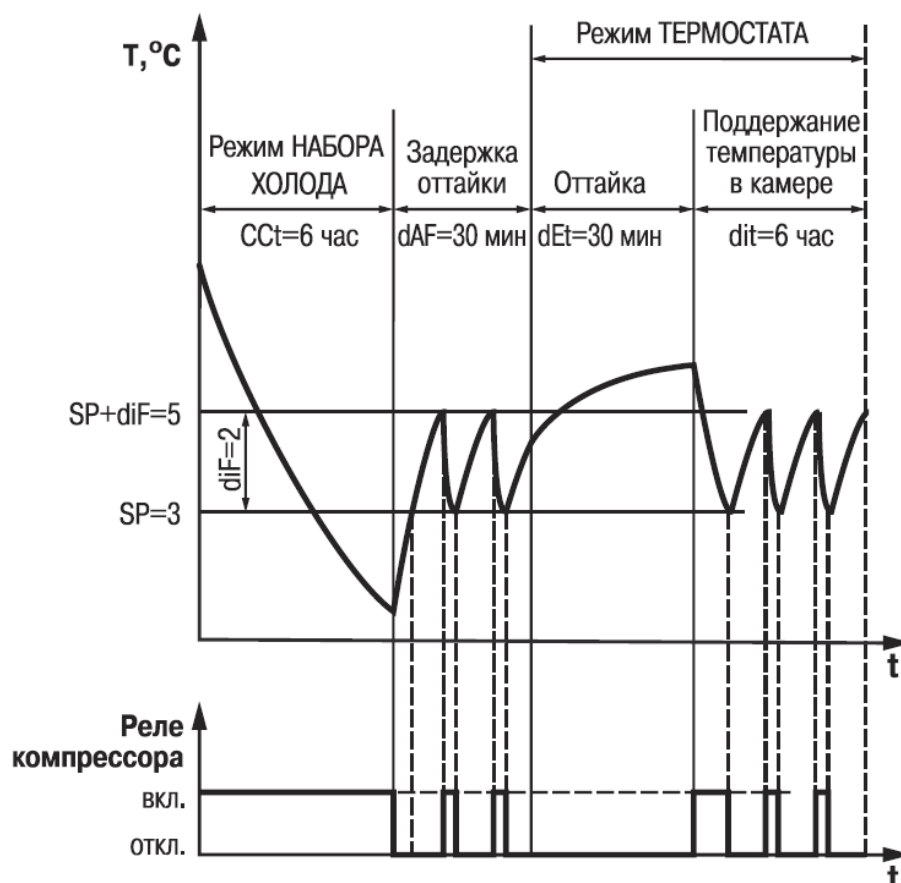


Рис. 4.4. Характер изменения температуры в камере и временная диаграмма работы компрессора

Рассмотрим режимы работы прибора ТРМ 974.

Режим ТЕРМОСТАТ. Поддержание заданной температуры в камере. Температурный режим в камере определяют параметры SP (*SetPoint* – контрольная точка) и diF (дифференциал). Для поддержания температуры в камере ТРМ 974 управляет работой компрессора и вентилятора. Компрессор запускается, когда температура в камере превышает значение $SP + diF$, и отключается, когда температура вновь снижается до значения контрольной точки. Вентилятор может по выбору пользователя включаться и выключаться вместе с компрессором или работать непрерывно. Можно также задать значение температуры камеры, ниже которой вентилятор автоматически отключается.

Оттайка холодильной камеры. Прибор ТРМ 974 периодически производит оттайку холодильной камеры. При необходимости оттайку можно запустить вручную, нажав кнопку на лицевой панели

прибора. Интервал между двумя оттайками можно отсчитывать по времени (1–99 ч) и по времени наработки компрессора (режим *Digifrost*).

Оттайку можно производить двумя способами – ТЭНом (компрессор выключен) и горячим паром (одновременно включены реле компрессора и реле ТЭНа).

Оттайка заканчивается:

- по истечении заданного времени;
- по достижении заданной температуры воздухоохладителя;
- при выполнении хотя бы одного из двух вышеназванных условий.

В ТРМ 974 можно задать время для слива воды по окончании оттайки. Кроме того, можно установить время задержки включения вентиляторов после оттайки (при этом компрессор и ТЭН также включены).

Режим НАБОР ХОЛОДА. Предназначен для быстрого охлаждения камеры, заполненной новым (теплым) продуктом. Пользователь задает время набора холода (1–24 ч), в течение которого компрессор принудительно включен. Можно задать также задержку оттайки после набора холода. По окончании оттайки прибор автоматически переходит в режим ТЕРМОСТАТ.

Особенности первого запуска ТРМ 974. При подаче питания поведение ТРМ 974 зависит от заданных пользователем установок:

- производится первая оттайка через 30 с после запуска;
- сразу после подачи питания прибор работает в режиме ТЕРМОСТАТ, время до первой оттайки равно интервалу между двумя оттайками;
- после запуска компрессор заданное время остается выключенным (во избежание пусковых перегрузок), после чего прибор переходит в режим ТЕРМОСТАТ.

Режим ТРЕВОГА. Работа прибора ТРМ 974 при выходе из строя датчиков.

Режим ТРЕВОГА включается:

- при выходе температуры в камере за заданные границы;
- при выходе из строя любого из датчиков;
- на цифровом индикаторе в режиме ТРЕВОГА появляются соответствующие аварийные сообщения.

При выходе из строя датчика камеры управление компрессором продолжается, но в аварийном режиме, когда время включения и время выключения компрессора жестко определены. При выходе из строя датчика воздухоохладителя компрессор отключает вентилятор.

Программируемые параметры прибора ТРМ 974 приведены в табл. 4.1; его технические характеристики – в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Параметры ТРМ 974

Обозначение	Название	Допустимые значения	Комментарии
<i>Параметры режима ТЕРМОСТАТ</i>			
<i>SP</i>	Контрольная точка (<i>Set Point</i>)	<i>LSE...HSE</i>	[град]
<i>LSE</i>	Минимум контрольной точки	– 50...+ 50	[град]
<i>HSE</i>	Максимум контрольной точки	–50...+ 50	[град]
<i>diF</i>	Дифференциал	+ 1...+ 50	[град]
<i>dCt</i>	Способ отсчета времени между оттайками	0 1	По времени <i>dit</i> <i>Digifrost</i>
<i>dit</i>	Интервал между оттайками	1...99	[ч], для <i>dCt</i> = 0
<i>CdP</i>	Время задержки запуска компрессора	0...30	[мин]
<i>COп</i>	Время работы компрессора без датчика при аварии	0...120	[мин]
<i>COF</i>	Время остановки компрессора без датчика при аварии	0...120	[мин]
<i>FnC</i>	Режим работы вентилятора	0 1	Вместе с компрессором. Непрерывно
<i>FSt</i>	Температура остановки вентиляторов	– 50...+ 50	[град]
<i>Ot</i>	Калибровка датчика камеры	– 12...+ 12	[град]
<i>OE</i>	Калибровка датчика воздухоохладителя	– 12...+ 12	[град]

Продолжение табл. 4.1

Обозначение	Название	Допустимые значения	Комментарии
<i>Параметры режима ТРЕВОГА</i>			
<i>ALC</i>	Способ отсчета порогов <i>LAL</i> и <i>HAL</i> для включения режима ТРЕВОГА	0 1	Пороги отсчитываются от <i>SP</i> . Пороги – абсолютные значения параметров <i>LAL</i> и <i>HAL</i>
<i>LAL</i>	Тревога при переохлаждении	– 50...+ 50	[град]
<i>HAL</i>	Тревога при перегреве	– 50...+ 50	[град]
<i>ALd</i>	Время задержки тревоги	0...120	[мин]
<i>dAO</i>	Время задержки тревоги при запуске	0...12	[ч]
<i>Параметры режима НАБОР ХОЛОДА</i>			
<i>CCt</i>	Время набора холода	1...24	[ч]
<i>dAF</i>	Время задержки оттайки после набора холода	0...120	[мин]
<i>Параметры оттайки</i>			
<i>dPO</i>	Время до начала первой оттайки после запуска	0 1	30 с. Значение <i>dit</i>
<i>ddL</i>	Параметр, выводимый на индикатор во время оттайки	0 1 2 3	Реальная температура. Температура в начале оттайки. Значение <i>SP</i> . Значение <i>dEF</i>
<i>tdF</i>	Способ (тип) оттайки	0 1	ТЭН. Горячий пар
<i>EdF</i>	Тип окончания оттайки	0 1 2	По времени <i>dEt</i> . По достижении температуры <i>dSt</i> . По выполнении условий 1 или 2
<i>dEt</i>	Максимальное время оттайки	1...120	[мин]

Окончание табл. 4.1

Обозначение	Название	Допустимые значения	Комментарии
<i>dSt</i>	Температура окончания оттайки	– 50...+ 50	[град]
<i>dt</i>	Время слива конденсата (воды)	0...120	[мин]
<i>End</i>	Задержка включения вентилятора после оттайки	0...120	[мин]

Таблица 4. 2

Технические характеристики ТРМ 974

Разрешающая способность измерения температуры	1 °С	
Диапазон поддержания температуры	– 50...+ 50 °С	
Время измерения температуры	Не более 1 с	
Характеристика	Тип корпуса	
	ЩЗ	Д
Напряжение питания	12 В постоянного или переменного тока	220 В 50 Гц
Максимальный/номинальный ток (при 220 В, $\cos \varphi \geq 0,4$) в сети управления: компрессором вентилятором нагревателем	3 А/1 А 3 А/1 А 3 А/1 А	10 А/1 А 3 А/1 А
Габаритные размеры, мм	74×32×70	72×88×54
Степень защиты корпуса со стороны передней панели	IP54	IP20

5. СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Принцип работы системы централизованного технического управления основан на централизации более или менее значительной информации, посылаемой локальными системами через сеть. Основными функциями системы централизованного технического управления являются:

- управление оборудованием в соответствии с графиком, аналоговыми или цифровыми и специальными программами;
- экономия энергоносителя;
- защита оборудования от недопустимых режимов работы;
- диалог «человек/машина» с визуализацией и запросом, обеспечивающими вывод на принтер или монитор контролируемых параметров, значений измененных датчиков, положения исполнительных механизмов, значений превышения предельных уровней, регулирование или управление схемами;
- возможность воздействия на исполнительные механизмы с центрального пульта, а также разнообразных почасовых, специализированных, автоматических, отвечающих на реакцию программ;
- хранение или архивирование собранной информации;
- обработка в информационном режиме любых значений и представление их в виде графиков, таблиц или иной форме.

Таким образом, благодаря централизации любой информации технический персонал немедленно оповещается о малейших отклонениях в работе технологического оборудования, точное место которого позволяет быстро принять меры. Кроме того, оборудование, работающее в режиме автореагирования и автонастройки, позволяет в сочетании с рациональным централизованным управлением оборудования в значительной степени экономить энергию за счет повышения эффективности и оптимизации времени работы. Все это обеспечивает более длительный срок эксплуатации оборудования.

Отсюда вытекают две функции любой централизованной системы технического управления – дистанционное наблюдение и дистанционное управление. Первая составляющая интересует службу эксплуатации, а вторая – службу управления. Действительно, технические службы нуждаются в оперативной информации о состоянии, в котором находится порученное им оборудование (например,

превышение величины температуры в холодильных камерах, величин давления всасывания и нагнетания, производительность установки, потребляемая мощность и т. д.). Отсюда следует необходимость дистанционного наблюдения. Дистанционное наблюдение происходит в масштабе реального времени и позволяет наилучшим образом организовать обслуживание. С другой стороны, служба управления должна располагать информацией о количестве потребляемой энергии, об оборудовании, нуждающемся в обслуживании и предстоящей технической модернизации. Отсюда вытекает необходимость дистанционного управления.

В табл. 5.1 в качестве примера представлено распределение информации о холодильной установке и ее эксплуатации между техническими службами управления.

Таблица 5.1

Распределение информации о холодильной установке и ее эксплуатации между техническими службами и службами управления

Тип информации	Техническая служба	Служба управления
Наблюдение за оборудованием	•	
Неполадки, аварии	•	
Невозможность доступа для обслуживания	•	
Регулирование производственного оборудования	•	
Работы по обслуживанию, уход	•	□
Контроль результата (например, температуры воздуха в камере холодильника)	•	□
Время работы оборудования	•	□
Счетчик используемой энергии (электричество, газ и т. д.)	•	■
Счетчик потребления ресурсов (вода для охлаждения)	•	■
Средние коэффициенты полезного действия	•	■
Дополнительные сведения, касающиеся эксплуатации	•	■

Технологии, применяемые для обеспечения этих функций дистанционного наблюдения и дистанционного управления, требуют различных типов структуры системы, которые можно разбить на централизованные (рис. 5.1) и децентрализованные [15].

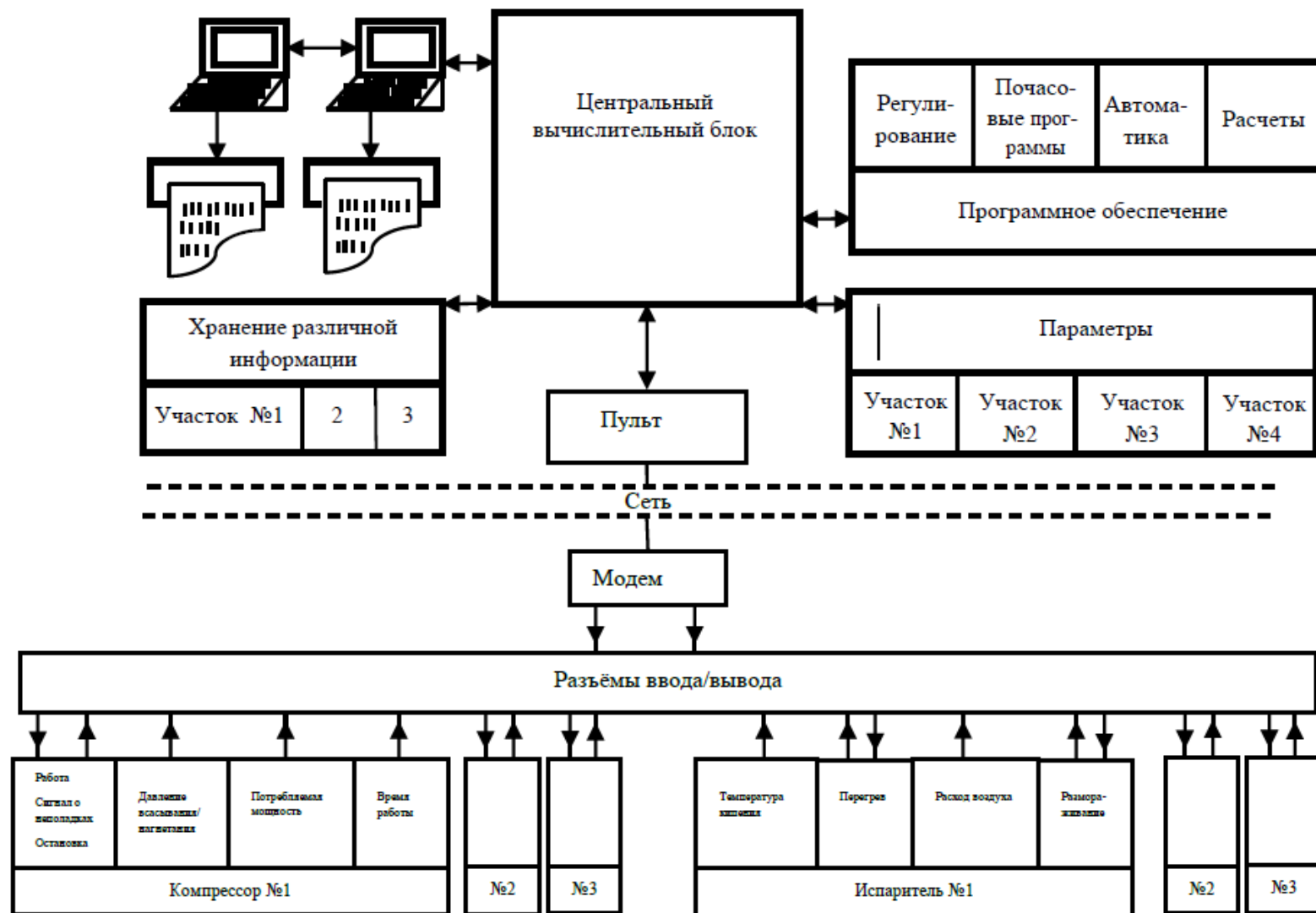


Рис. 5.1. Централизованная система управления

В централизованной системе все логические функции и расчеты осуществляются в центре приема и хранения в памяти информации от датчиков температуры, давления, расхода и т. д. Центральный вычислительный блок, имея программное обеспечение, производит обработку информации, выработку опорных значений или команд, которые зависят от хранящихся в памяти параметров для каждого обслуживаемого участка.

При централизованной (децентрализованной) системе вся логическая часть системы сосредоточена в техническом помещении, предназначенном для наблюдения. Вычислительная машина, снабженная необходимыми программами, может обеспечивать все функции автоматики, регулирования, программирования, регистрацию, а также может выполнять расчеты требуемых соотношений. Пример структурной схемы централизованной (децентрализованной) системы показан на рис. 5.2.

Выбор регулятора и закона управления

Тип регулятора и закон управления (регулирования) выбирают в зависимости от технологических показателей, свойств объекта управления, а также требований к качеству процесса регулирования. По упрощенной инженерной методике можно выбрать вид регулирования в зависимости от динамических свойств объектов регулирования, времени чистого запаздывания τ и постоянной времени объекта регулирования T_0 . Отношение τ/T_0 называется коэффициентом относительного запаздывания объекта регулирования. Чем это отношение больше, тем задача автоматизации сложнее, поэтому рекомендуется: при $\tau/T_0 < 0,2$ – позиционный регулятор; при $0,2 \leq \tau/T_0 \leq 1$ – регулятор непрерывного действия при $\tau/T_0 > 1$ – импульсный или цифровой регулятор. Однако данные рекомендации не являются исчерпывающими, так как позиционные системы регулирования характеризуются автоколебаниями регулируемой величины; если технология автоматизируемого процесса не допускает автоколебательного режима, то возможно применение регулятора непрерывного действия.

Одной из основных характеристик качества процесса регулирования является точность, оцениваемая значением статической ошибки, т. е. остаточным отклонением регулируемой величины от заданного значения по окончании переходного процесса, она не должна выходить за пределы, допускаемые технологическими процессами.

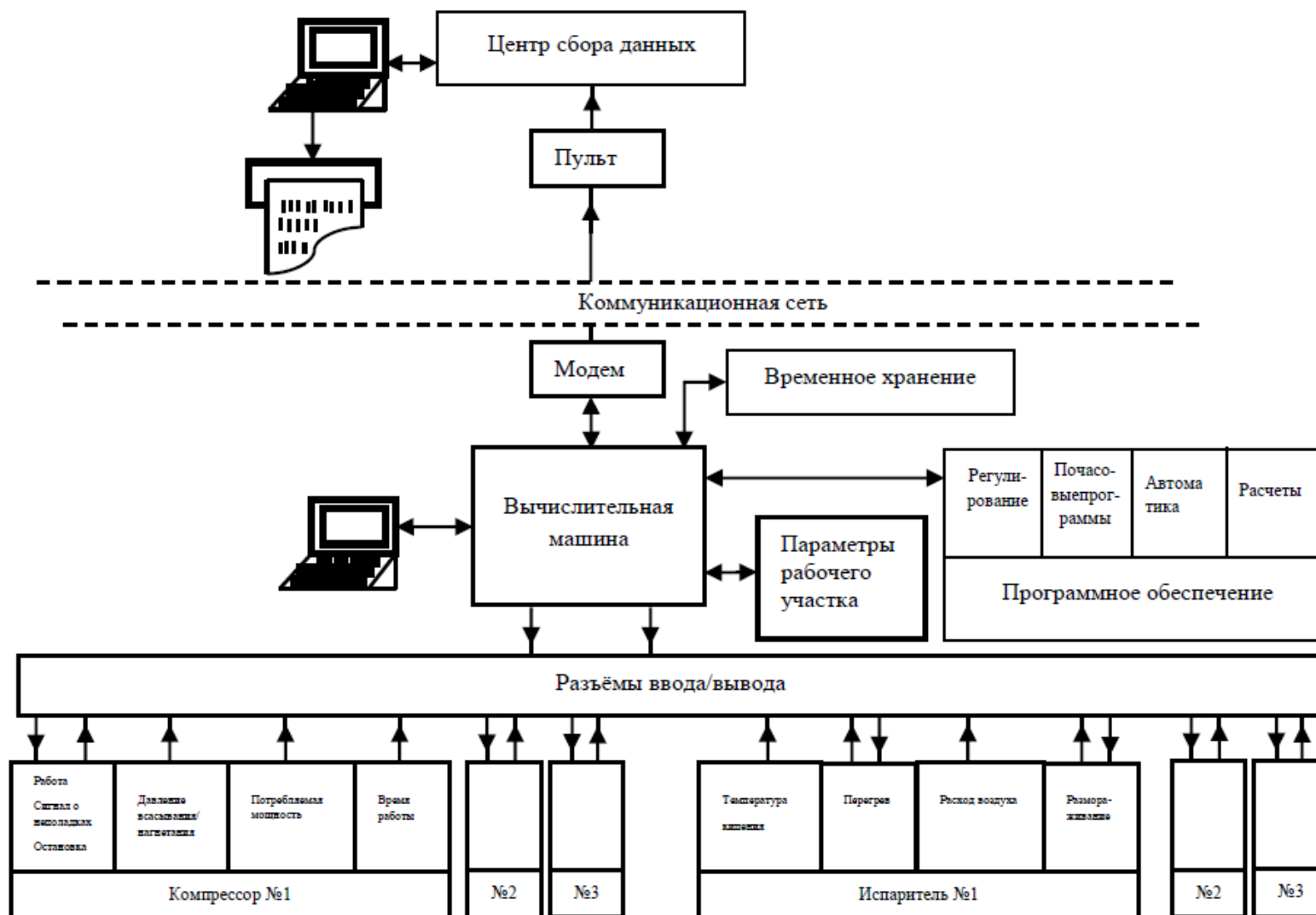


Рис. 5.2. Структурная схема управления

Кроме рассматриваемого показателя качества, имеются другие – прямые, которые определяются непосредственно из кривой переходного процесса, и косвенные.

К показателям качества регулирования в переходном режиме (рис. 5.3) относятся:

- динамическое отклонение y_1 , y_2 , y_3 , измеряемое в единицах регулируемой величины y и характеризующее отклонение от установившегося заданного значения $y_{уст}$;

- время регулирования t_p , характеризующее быстродействие системы, охватывающее отрезок времени от момента поступления возмущения до момента, когда регулируемый параметр войдет в заранее заданные пределы Δy . Это время зависит от свойств объекта, параметров настройки регулятора и требований технологического процесса;

- степень затухания, характеризующая быстроту затухания колебательного переходного процесса: $\Psi = y_1 - y_3/y_1$.

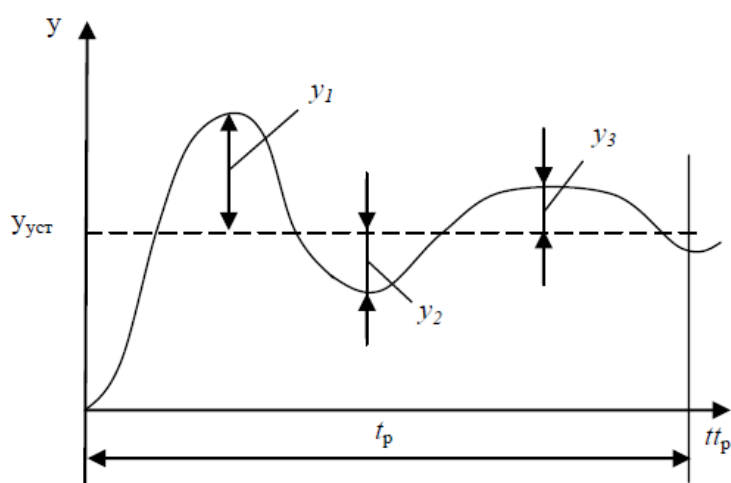


Рис. 5.3. Регулирование при переходном режиме

Изменяя параметры настройки регулятора, можно получить от $\Psi = 0$ до $\Psi = 1$; при $\Psi = 0$ система находится на границе устойчивости, при $\Psi = 1$ – для апериодических процессов. Таким образом, изменяя настройки регулятора при любом законе регулирования, можно получить различное перерегулирование.

В проектах автоматизации холодильных систем наибольшее распространение получили апериодические переходные процессы и процессы с 20 %-м перерегулированием.

К косвенным показателям относятся:

- степень устойчивости α – определяется расстоянием ближайшего корня характеристического уравнения замкнутой системы;
- степень колебательности m – определяется по расположению корней характеристического уравнения относительно мнимой оси. Степень колебательности связана со степенью затухания Ψ отношением $\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$;
- показатель колебательности M – определяется по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы (рис. 5.4):

$$M = A_{\max}/A_0.$$

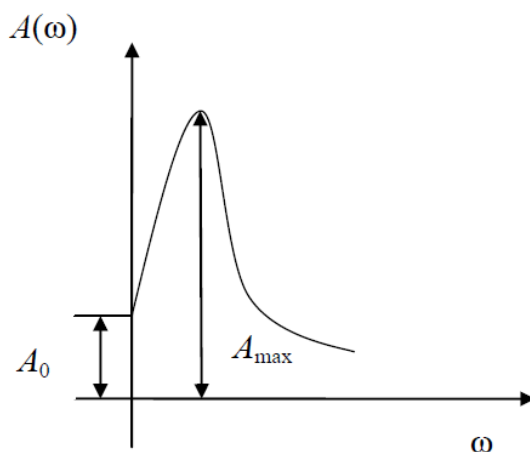


Рис. 5.4. Амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы

Недостаток перечисленных показателей заключается в том, что каждый из них характеризует только один признак переходного процесса. Рассмотренные показатели и критерии качества рассчитаны на оценку качества переходного процесса при отработке детерминированных воздействий (ступенчатой формы).

Между тем реальные системы обрабатывают возмущения случайного характера. Если входной сигнал – случайная величина $X(t)$, то и выходной сигнал $Y(t)$ тоже случайная величина.

На рис. 5.5 показан пример разгона статического объекта.

Качество работы таких систем оценивают значением средне-квадратичного отклонения выходного сигнала.

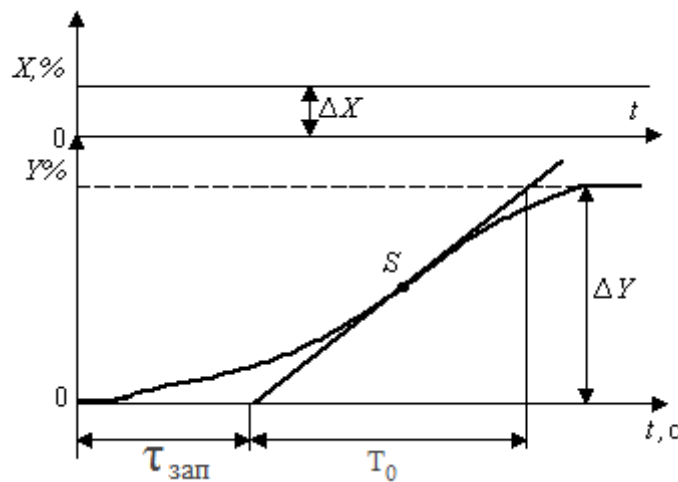


Рис. 5.5. Кривая разгона статического объекта

В качестве примера можно рассмотреть изменение температуры в холодильной камере. На изменение температуры влияют: масса груза, поступающего в охлаждаемый объем; кроме того, некоторые грузы (плодоовощная продукция) выделяют теплоту за счет «дыхания», что будет вносить возмущение; открывание дверей в момент погрузки–выгрузки; теплота, вносимая погрузчиками, людьми, освещением, работой вентиляторов; теплопритоки через стены, которые изменяются в зависимости от состояния атмосферы.

Таким образом, перечисленные возмущения случайны по своей природе, регулятор должен обеспечивать автоматическое изменение параметров настройки.

Метод синтеза одноконтурных автоматических систем регулирования

Задачей синтеза систем регулирования являются: выбор закона регулирования и определение параметров настройки регулятора, обеспечивающее заданное или оптимальное качество переходных процессов.

Выбор закона регулирования основывается на требованиях к качеству стабилизации параметров, динамическим характеристикам объекта регулирования и характеристикам возмущающих воздействий. При этом значения возмущающих воздействий оценивают по входному регулируемому воздействию X , обеспечивающему их компенсацию. Обычно для выбора закона регулирования исполь-

зуют номограммы, составленные для трех наиболее распространенных типов переходных процессов:

- а) без перерегулирования;
- б) с 20 %-м перерегулированием;
- с) с минимальной квадратичной ошибкой.

С увеличением инерционности объекта, характеризуемой отношением τ/T_0 , и изменением коэффициента усиления регулятора K должны быть использованы более сложные законы регулирования [16].

Если возмущение, меняющее динамику объекта, можно изменить, то лучший прием, обеспечивающий высокое качество регулирования, – параметрическая компенсация, т. е. автоматическое изменение параметров настройки регулятора. Данная операция выполняется по команде вычислительного устройства, обрабатывающего информацию о состоянии объекта, в соответствии с заранее разработанным алгоритмом.

В настоящее время выпускаемые микропроцессорные измерители-регуляторы осуществляют настройку регулятора непосредственно на объекте. Она включает в себя, как правило, два этапа:

- предварительную настройку регулятора;
- точную настройку регулятора, или настройки в процессе эксплуатации системы на объекте.

Предварительная настройка. В этот период регулятор работает по двухпозиционному закону. На рис. 3.65 представлен график изменения температуры в помещении, происходящего по синусоидальному закону. Регулятор при запуске системы первый пик амплитуды пропускает, а для первого целого колебания (между точками 1 и 2 на рисунке) прибор определяет амплитуду A и период этого колебания как сумму $t_n + t_o$. Из полученных значений амплитуды и периода автоколебаний прибор вычисляет приближенные значения коэффициентов «ПИД» регулятора (X_p , $\tau_{ин}$, $\tau_{д}$) для данной системы.

Точная настройка. В процессе точной настройки регулятор возбуждает колебания входной величины вокруг уставки с амплитудой Δ ; значение Δ задается пользователем.

Рекомендуется задавать величину Δ , которую прибор определил при предварительной настройке. В любом случае значение Δ должно быть не меньше амплитуды колебаний A , вычисленной в режиме предварительной настройки.

Пользователь также должен задать отношение τ_d/τ_i . Чем меньше величина этого отношения, тем будет меньше влияние дифференциальной составляющей «ПИД» регулятора. Это значение, как правило, устанавливается заводом-изготовителем и является удовлетворительным.

Точная автонастройка производится методом последовательного приближения значений параметров регулятора к оптимальным [13].

Прибор запускает синусоидальные колебания и пересчитывает коэффициенты «ПИД» регулятора X_p , τ_d , τ_i до тех пор, пока характеристики практически возбуждаемых колебаний не будут соответствовать расчетным.

6. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исполнительный механизм является конечным элементом автоматической системы и предназначен для отработки управляющего воздействия его рабочим органом, который активно воздействует на материальный или энергетический поток, необходимый для хода технологического процесса. Исполнительные механизмы (устройства) классифицируются по следующим признакам:

а) виду статической характеристики – позиционные и функциональные;

б) виду подводимой и потребляемой энергии: электрические, пневматические и гидравлические.

К исполнительным механизмам (устройствам) относятся: электро- и пневмоприводы с регулирующими органами, а также клапаны и вентили для жидкости и газов; задвижки, заслонки, шиберы для газообразных и сыпучих веществ; контактные устройства, реостаты, автотрансформаторы для управления электрическими цепями.

К исполнительным устройствам предъявляются следующие требования:

- высокая точность воспроизведения закона регулирования, так как исполнительный механизм является выходом регулятора;

- жесткость механической характеристики, т. е. скорость перемещения регулирующего органа не должна зависеть от момента нагрузки, приложенного к нему;

- линейность статической характеристики для функциональных исполнительных устройств, под которой понимается зависимость между скоростью перемещения регулирующего органа и сигналом управления;

- малая инерционность подвижных частей исполнительного механизма;

- инвариантность к вибрациям и климатическим условиям;

- достаточная мощность приведения в движение рабочего органа для всех режимов работы исполнительного механизма;

- наличие устройств защиты от перегрузок и поломок;

- наличие ручного управления при нарушении электропитания.

Исполнительные механизмы (ИМ) характеризуются следующими параметрами:

- номинальными значениями вращающего момента на выходном валу;
- коэффициентом полезного действия, т. е. отношением максимальной полученной мощности на валу ИМ к мощности, отбираемой из источника энергии;
- потребляемой мощностью;
- максимальным углом поворота или максимальным ходом штока регулирующего органа (РО) и временем перемещения элемента РО из одного крайнего положения в другое.

Электрические исполнительные устройства подразделяются на электромагнитные и электродвигательные (последние, в свою очередь, могут быть постоянного и переменного тока). Несмотря на возможность простого регулирования величины крутящего момента в двигателях постоянного тока путём изменения напряжения на обмотке управления, применение их ограничено из-за наличия скользящих контактов, приводящих к снижению надёжности этих механизмов.

6.1. Электродвигательные исполнительные механизмы

В состав электродвигательного исполнительного механизма входят электродвигатель постоянного или переменного тока и редуктор, который обеспечивает кинематическую связь между валом электродвигателя и регулирующим органом. Кроме того, исполнительные механизмы могут комплектоваться дополнительными элементами в виде конечных выключателей, сигнализаторов крайних положений регулирующего органа, указателями положения регулирующего органа. По ходу регулирующего органа электродвигательные исполнительные механизмы бывают двухпозиционными и функциональными (пропорциональными), у которых регулирующий орган может занимать любое положение в пределах 0–100 % хода регулирующего органа (ХРО).

При двухпозиционном регулировании исполнительный механизм, получив управляющий сигнал от системы управления, приводит в действие регулирующий орган и устанавливает его в одно из крайних положений независимо от величины отклонения регулируемого параметра от заданного значения. При пропорциональном регулировании исполнительный механизм и регулирующий орган изменяют свое положение пропорционально сигналу рас-

согласования между реальной и заданной величинами регулирующего параметра, т. е. каждому значению регулируемого параметра соответствует определенное положение регулирующего органа.

6.1.1. Исполнительные механизмы двухпозиционного регулирования типа ДР

Данные исполнительные механизмы предназначены для двухпозиционного автоматического и дистанционного ручного управления в качестве привода органов, где в качестве регулирующих органов применяют запорно-регулирующую аппаратуру в виде клапанов, заслонок, переключающих устройств, устанавливаемых на соответствующих трубопроводах. В состав исполнительного механизма типа ДР (рис. 6.1) входят: асинхронный двухфазный нереверсивный двигатель, ползун, редуктор (на схеме не показан) и узел управления, заключенные в общий пыленепроницаемый корпус, выполненный из силумина.

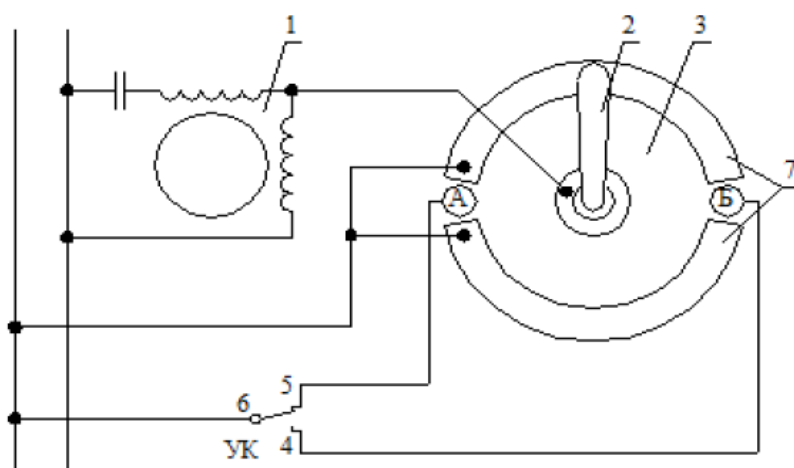


Рис. 6.1. Исполнительный механизм двухпозиционного регулирования:

- 1 – двигатель; 2 – ползун; 3 – узел управления;
4–6 – управляющий контакт; 7 – пластины

Редуктор состоит из шести пар цилиндрических зубчатых шестеренок, ведущая шестерня первой пары закреплена на валу двигателя, а ведомая жестко связана с выходным валом исполнительного механизма. Комбинация шестеренок позволяет изменять передаточное число редуктора так, что выходной вал испол-

нительного механизма поворачивается на 180° за 10, 30, 60 и 120 с. На заводе-изготовителе передаточное число редуктора настраивается на 30 с, при этом момент на выходном валу составляет $9,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Исполнительный механизм типа ДР-М имеет шток, получающий возвратно-поступательное движение от эксцентрика, жестко посаженного на выходной вал механизма.

Управление исполнительным механизмом осуществляется управляющим контактом (УК) 4–6, который является выходным контактом двухпозиционного регулятора и который можно переключить из положения 4 в положение 5 и наоборот вручную. В состоянии покоя электродвигателя ползун 2 может быть в положении контакта «А» либо «Б». При переброске контакта 4–6 в положение, при котором статорные обмотки электродвигателя получают питание, вал исполнительного механизма переместит ползун 2 с соответствующего контакта «А» или «Б» на токонесущие пластины 7, после чего, уже независимо от состояния контактов 4–6, вал механизма отработает угол в 180° до следующего контакта «А» или «Б» и двигатель остановится, так как обрывается цепь питания обмоток электродвигателя. Таким образом, после открытия или закрытия клапана либо другого регулирующего органа электродвигатель автоматически останавливается и удерживается в этом положении до изменения положения контактов 4–6.

Питание исполнительного механизма от сети переменного тока 220 В, 50 Гц; потребляемая мощность 50 Вт; условия эксплуатации $+5...+40^\circ\text{C}$ при относительной влажности не более 80 %. Применяется в технологических процессах, в которых недопустим быстрый перепад давления при срабатывании исполнительного механизма, т. е. в тех случаях, когда нельзя на трубопроводах по указанной причине ставить ventильные исполнительные механизмы, в отличие от которых регулирующий орган механизма двухпозиционного регулирования изменяет проходные сечения постепенно в течение 10–120 с.

6.1.2. Исполнительные механизмы пропорционального регулирования типа ПР

Исполнительные механизмы типа ПР (ПР-М, ПР-1М) относятся к группе пропорциональных исполнительных механизмов и предназначены для перемещения регулирующего органа в системах

автоматического регулирования, содержащих статический или изодромный регулятор.

На рис. 6.2 показана электрическая схема исполнительного механизма типа ПР-М, в которую входят: асинхронный двухфазный реверсивный электродвигатель 1, управляющий контакт (УК) 2–4, конечные выключатели ВК1 и ВК2, переменное сопротивление R , включенное по схеме потенциометра и являющееся датчиком указателя положения вала исполнительного механизма.

Сопротивление переменного резистора R составляет (185 ± 5) Ом. К выходу потенциометра подключен индикатор положения (ИП) в виде милливольтметра, шкала которого градуируется в пределах 0–100 % хода регулирующего органа. Следует отметить, что в замкнутой системе регулирования переменное сопротивление R одновременно выполняет функции датчика обратной связи по положению вала исполнительного механизма.

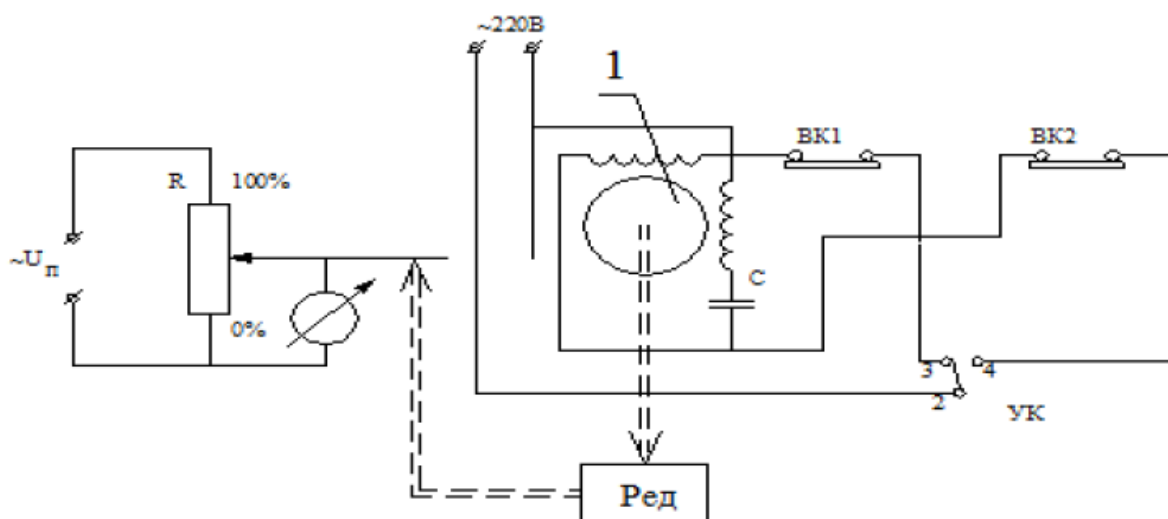


Рис. 6.2. Электрическая схема исполнительного механизма типа ПР-М:
1 – электродвигатель; 2–4 – управляющий контакт

Как видно из рис. 6.2, движок переменного сопротивления R через редуктор кинематически связан с валом электродвигателя. Все элементы исполнительного механизма, за исключением индикатора положения, заключены в пыленепроницаемый силуминовый корпус. Структура редуктора такая же, как и у механизма ДР.

Блок конечных выключателей ВК1, ВК2 переключается кулачками, жестко закрепленными на выходном валу редуктора. Конечные выключатели ограничивают угол поворота выходного вала механиз-

ма, путем ручной перестановки положения кулачков на валу этот угол можно менять в пределах $0-180^\circ$.

Статорные обмотки электродвигателя через ВК1 и ВК2 коммутируются через контакты 2–3 или 2–4 на фазу переменного тока 220 В. Управляющий контакт может быть выходом релейно-импульсного регулятора. При подходе вала исполнительного механизма к крайнему положению кулачки отжимают соответствующий конечный выключатель, цепь питания статорных обмоток обрывается и вал двигателя останавливается, переместив регулирующий орган в одно из крайних положений. При переброске УК в другое положение на статорные обмотки опять коммутируется напряжение и вал исполнительного механизма перемещает регулирующий орган в другом направлении.

Для установки регулирующего органа на промежуточное значение ХРО нужно исполнительный механизм включить в выходную цепь регулирующего устройства, а переменное сопротивление R включить в мостовую схему вместе с задатчиком угла поворота.

Мощность, потребляемая исполнительным механизмом типа ПР, составляет 50 Вт; момент на его выходном валу при скорости перемещения 6 град/с составляет $9,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

6.1.3. Исполнительные механизмы типа МЭО

Электрические однооборотные исполнительные механизмы постоянной скорости типа МЭО-6.3 предназначены для перемещения регулирующих органов в системах автоматического регулирования и управления.

Основными узлами исполнительного механизма являются электропривод, редуктор, блок конечных выключателей и потенциометр обратной связи. Принципиально электрическая схема МЭО не отличается от схемы ПР, поэтому она здесь не приводится. В качестве электропривода в механизмах применяется двухфазный асинхронный реверсивный электродвигатель. Редуктор состоит из шести пар цилиндрических зубчатых колес.

Исполнительные механизмы могут иметь конечные выключатели, как у механизма типа ПР, так и блок переключателей. Конечные выключатели предназначены для электрического ограничения крайних положений выходного вала. Блок переключателей, кроме того, дополнительно предназначен для обратной связи по конечным

положениям выходного вала и сигнализации его крайних положений. Величину хода выходного вала механизма можно установить изменением положения кулачков, воздействующих на контакты конечных выключателей.

Выпускаются всего 12 модификаций этих механизмов, отличающихся номинальным временем переброса выходного вала механизма из одного крайнего положения в другое (10, 25 и 63 с) и типом выключателей и переключателей. Мощность, потребляемая электродвигателем, составляет 65 Вт от сети 220 В переменного тока при номинальной нагрузке на валу в 6,3 Н · м; максимальная нагрузка составляет не более 10 Н · м; номинальный ход выходного вала составляет 90°, а максимальный – 180°. Выходной вал имеет эксцентрик со штоком, что может обеспечить возвратно-поступательное движение регулирующего органа в 20 мм при угле поворота вала 180°.

С точки зрения динамики электродвигательные исполнительные механизмы представляют собой интегрирующие звенья, выходным параметром которых является угол поворота выходного вала. За постоянную интегрирования принимается время переброса вала исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое. Время перестановки регулирующего органа из одного крайнего положения в другое определяется соотношением

$$\tau = T_{\text{и.м}}/K,$$

где $T_{\text{и.м}}$ – постоянная интегрирования исполнительного механизма; K – коэффициент, учитывающий вид кинематической связи между выходным валом механизма и регулирующим органом.

6.2. Электромагнитные исполнительные механизмы

В холодильных системах наибольшее применение получили соленоидные вентили прямого и непрямого действия. В основу работы этих исполнительных механизмов положен электромагнит (соленоид), который при подаче на него напряжения обеспечивает перемещение подвижных частей вентиля, открывая либо закрывая проходное сечение для потока жидкости или газа по трубопроводу.

Соленоидные вентили прямого действия применяются для трубопроводов малых диаметров (до 15 мм). Один из возможных вариантов таких вентилей фирмы Danfoss показан на рис. 6.3.

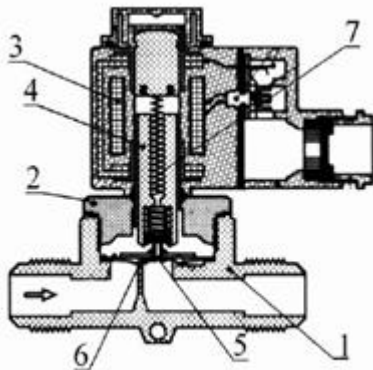


Рис. 6.3. Электромагнитный клапан:
1 – корпус; 2 – катушка электромагнита; 3 – сердечник; 4 – шток;
5 – клапан; 6 – седло; 7 – возвратная пружина

В состав вентили входят: корпус с входным и выходным патрубками, катушка электромагнита с сердечником, который жестко связан со штоком, клапан с седлом клапана и возвратная пружина. При подаче напряжения на катушку электромагнита 2 сердечник 3 втягивается и через шток 4 отрывает клапан 5 от седла 6, при этом открывается проходное сечение для потока жидкости через вентиль. При снятии напряжения с катушки электромагнита за счет возвратной пружины 7 сердечник катушки опускается, перекрывая клапаном проходное сечение вентили.

6.3. Пневматические исполнительные механизмы

В пневматических исполнительных механизмах перестановочное усилие создается за счет давления сжатого воздуха [17]. В качестве элемента, воспринимающего давление в пневматических ИМ, используются мембраны, поршни или сильфоны.

Пневматические исполнительные механизмы подразделяются на пружинные и беспружинные. В пружинных ИМ перестановочное усилие в прямом направлении создается за счет энергии сжатого воздуха, а в обратном направлении – за счет силы упругой деформации пружины. В беспружинных ИМ перестановочное усилие в обоих направлениях создается за счет энергии сжатого воздуха.

По виду статической характеристики пневматические ИМ подразделяются на позиционные и функциональные.

6.3.1. Позиционные пневматические исполнительные механизмы

Позиционные исполнительные механизмы используются на трубопроводах в качестве запорных или переключающих устройств. Один из вариантов конструкции поршневого позиционного ИМ показан на рис. 6.4.

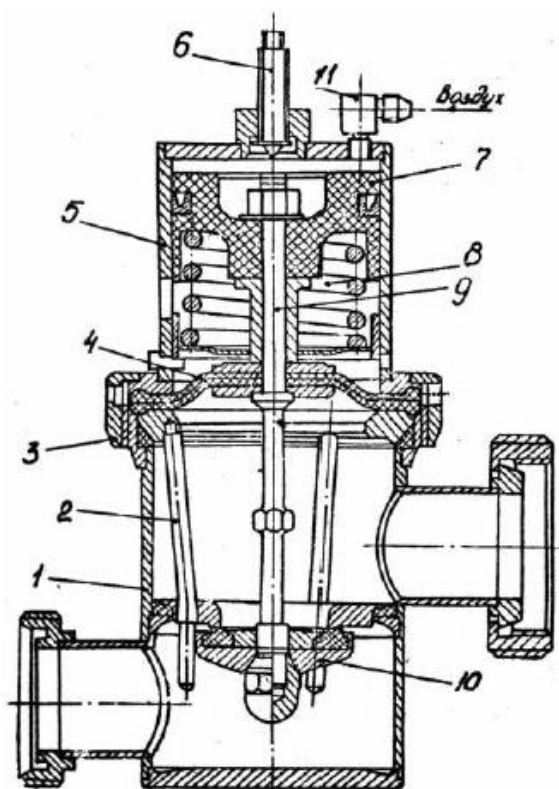


Рис. 6.4. Поршневой позиционный исполнительный механизм:
1 – корпус клапана; 2 – вставка; 3 – гайка; 4 – мембрана; 5 – корпус ИМ;
6 – винт; 7 – поршень; 8 – возвратная пружина; 9 – шток;
10 – тарелка клапана; 11 – штуцер

Сжатый воздух, поступаая через штуцер 11 в пространство над поршнем 7, перемещает поршень вниз, а вместе с ним шток 9 и тарелку клапана 10. При соединении пространства над поршнем с атмосферой тарелка возвращается в исходное положение под действием возвратной пружины 8. Корпус 5 пневматического ИМ

соединяется с корпусом клапана 1. В корпус 1 помещена вставка 2, состоящая из седла и верхнего кольца, соединенных наклонными стойками при помощи накидной гайки 3. Мембрана 4 служит для разделения полости ИМ и рабочей полости клапана. Винт 6 предназначен для ручного управления поршнем с помощью накидного ключа. Принципиальной особенностью клапана является двустороннее запираение за счет того, что площадь разделительной мембраны больше площади тарелки клапана. Поэтому результирующая сила от давления пропускаемой среды над тарелкой клапана направлена вверх, обеспечивая его надежное запираение.

На рис. 6.5 приведена конструкция переключающего мембранного пневматического клапана.

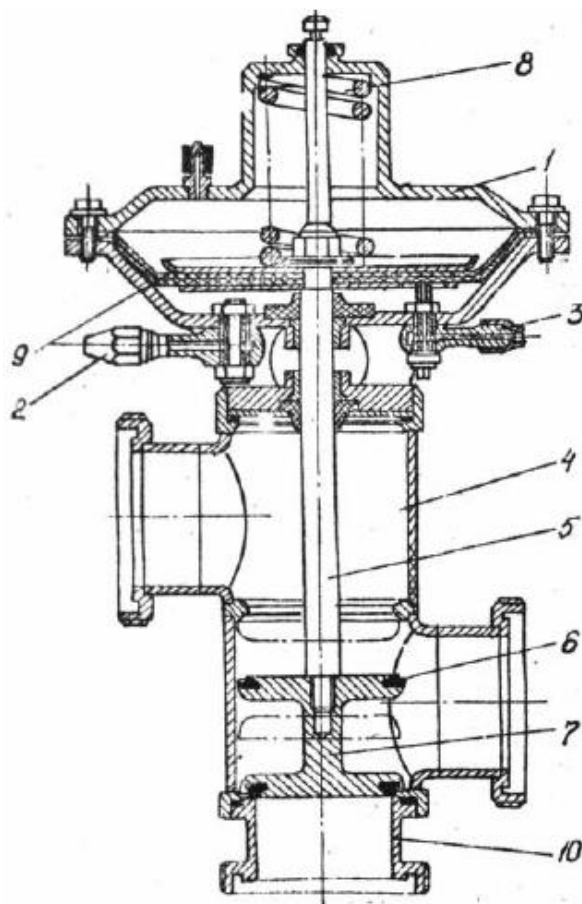


Рис. 6.5. Переключающий мембранный пневматический клапан:
1 – корпус ИМ; 2, 3 – штуцеры; 4 – корпус; 5 – шток; 6 – резиновые кольца;
7 – запорный орган; 8 – нажимная пружина; 9 – силовая мембрана;
10 – гнездо клапана

В корпусе 4 находится шток 5 с запорным органом 7, имеющим уплотнительные резиновые кольца 6. Силовая мембрана 9 исполнительного механизма размещена в верхней части корпуса 1 ИМ. Внутри корпуса помещена нажимная пружина 8. Сжатый воздух подается под мембрану через штуцер 2, штуцер 3 служит для подачи воздуха к устройству индикации. При положении клапана 7, показанном на рисунке, поток среды пойдет с правого патрубка на левый. При подаче сжатого воздуха под силовую мембрану 9 клапан переместится в верхнее положение (на рисунке показано пунктиром) и тем самым перекроет проход в левый патрубок и откроет для потока жидкости нижний патрубок.

Таким образом, произойдет переключение направления потока. Переключающий клапан можно легко переделать в проходной, если поставить заглушку на нижний патрубок.

6.3.2 Функциональные пневматические исполнительные механизмы

Функциональные ИМ являются исполнительными органами с пропорциональной статической характеристикой и используются совместно с пневматическими функциональными регуляторами различных параметров, изменение которых связано с изменением расхода среды.

На рис. 6.6 показана конструкция функционального клапана типа ПРК. Основными частями являются мембранно-пружинный исполнительный механизм и собственно клапан. При увеличении давления сжатого воздуха над мембраной 2 грибок 1 с прикрепленным к нему подвижным стаканом 3 сжимает пружину 18 и шток 5, связанный с плунжером 14, перемещается вниз. Перемещение штока h определяется уравнением

$$h = KP_{\text{упр}} + A,$$

где K – коэффициент, характеризующий наклон статической характеристики ИМ, м/Па; $P_{\text{упр}}$ – давление управляющего сигнала, Па; A – коэффициент, характеризующий зону нечувствительности исполнительного механизма, м.

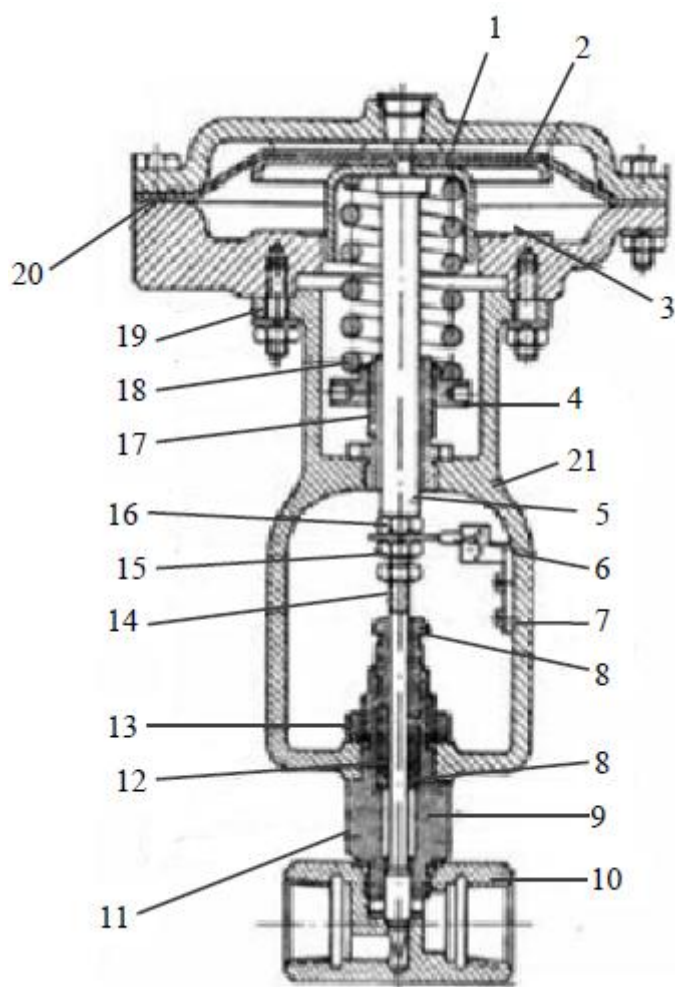


Рис. 6.6. Конструкция функционального клапана типа ПРК:
 1 – грибок; 2 – мембрана; 3 – подвижный стакан; 4, 13, 15, 16 – гайки;
 5 – шток; 6 – указатель; 7 – крепление указателя; 8, 9, 17 – втулки;
 10 – клапан; 11 – штуцер; 12 – набивка сальниковая; 14 – плунжер;
 18 – пружина; 19–21 – элементы корпуса

Предварительное сжатие пружины, определяющее величину A , регулируется вращением гайки 4 по резьбе неподвижной направляющей втулки 17, ввернутой в корпус 21. Степень предварительного сжатия пружины подбирается таким образом, чтобы начало движения штока вниз было при давлении над мембраной в пределах $0,49 \cdot 10^4$ – $1,47 \cdot 10^4$ кПа. При дальнейшем увеличении давления шток и штуцер должны опуститься на 7 мм вниз и перекрыть посадочное отверстие в корпусе клапана 10. Величина хода штока и плунжера контролируется указателем 6, закрепленным между гайками 15, 16.

Перемещение штока клапана определяется только значением управляющего давления $P_{упр}$. Герметичность плунжера обеспечивается сальниковой набивкой 12 и втулкой 8, ввернутой в штуцер 11. Корпус клапана 10 крепится к корпусу исполнительного механизма 21 с помощью штуцера 11 и гайки 13. Клапаны ПРК применяются совместно с пневматическими регуляторами или приборами дистанционного управления.

Различают модификации клапанов с буквенными индексами «ВО» и «ВЗ»: «ВЗ» соответствует закрытому положению клапана при отсутствии управляющего давления, а «ВО» – открытому.

7. ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМ ПРОГРАММНО-ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизация многих технологических процессов, имеющих периодический характер, будет наиболее рациональной, если использовать схемы и системы программно-логического управления. Это могут быть автоматический запуск и остановка агрегатов технологической линии, логическая зависимость последующей технологической операции от предыдущей, автоматизация поддержания режимов работы узлов, блоков и систем в цепочке технологических процессов, где требуется формирование последовательности двухпозиционных управляющих команд во времени при соблюдении заданных логических условий.

Холодильная установка, как объект управления, является объектом логического характера, так как имеет много задач, которые проще решить с помощью схем программно-логического управления. Простейшим примером может служить регулирование температуры объектов установки: холодопроизводительность компрессора нужно увеличить, если повысилась температура воздуха холодильной камеры до определенного значения; расход охлаждающей воды на кожухотрубный конденсатор нужно увеличить, если повысилось давление конденсации, и т. д. Задача запуска компрессора является чисто логической, ибо его нельзя запустить, если не соблюден ряд условий: нет через 5–7 с протока воды через охлаждающую рубашку компрессора, недостаточное давление масла в картере, не запущены водяные насосы подачи воды на конденсатор и т. д. Задачи защиты параметров холодильной установки от опасных режимов работы, их блокировки и сигнализация тоже являются чисто логическими.

Для решения логических задач применяют одноктактные и многотактные системы управления. В одноктактных системах наличие сигнала на выходе определяется только комбинацией сигналов на входе, поступающих от датчиков задающих или командных устройств. Примером могут служить приведенные выше условия запуска компрессора, когда формируется выходной сигнал, поступающий на катушку магнитного пускателя привода компрессора.

В многотактных системах сигнал на выходе автоматического устройства определяется не только входными сигналами, поступившими в данный момент, но и последовательностью их появления, т. е. при одной и той же комбинации входных сигналов, но формирую-

щихся в различной последовательности; на выходе многотактного автоматического устройства формируются различные выходные сигналы. Такие системы называются последовательными и в своей структуре обязательно содержат элементы памяти, элементы обратных связей и различные элементы дискретной автоматики. Как уже указывалось, при автоматизации производственных процессов большая часть операций (от 50 до 90 %) имеет характер логических решений, т. е. зависит от выполнения определенных условий. Одним из типов управляющих систем являются переключательные схемы управления, реализованные на релейных (контактных и бесконтактных) и логических элементах.

В переключательных схемах входной и выходной сигналы являются дискретными и могут принимать только два значения с различной физической сущностью: замыкание или размыкание контактов реле; высокий или низкий потенциал на выходе дискретного элемента (например, триггера); наличие или отсутствие импульса на выходе устройства, например аналого-цифрового преобразователя.

7.1. Дискретные устройства автоматики

К дискретным устройствам автоматики относятся релейные (контактные и бесконтактные) устройства, логические элементы, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), бесконтактные переключатели. Дискретные устройства обеспечивают преобразование аналогового (непрерывного) сигнала на входе в дискретный сигнал на выходе. Для случая с ЦАП процесс преобразования обратный, т. е. комбинация импульсов преобразуется в аналоговый сигнал.

К релейным устройствам относятся устройства, преобразующие плавное изменение входного сигнала в скачкообразное изменение выходной величины. Если реле контактное (например, магнитоэлектрическое), то замкнутому состоянию контактов приписывается «1», а разомкнутому – «0»; если реле бесконтактное, то высокому потенциалу на выходе приписывается «1», а низкому потенциалу – «0». Релейные устройства широко применяются в качестве элементов управления, защиты, блокировки, дискретных датчиков и усилителей, логических элементов и размножителей сигналов.

Реле классифицируются по различным признакам:

- по виду физических величин, поступающих на вход, – электрические и пневматические;
- по назначению – реле управления, блокировки, защиты, сигнализации и связи;
- по принципу воздействия на выходную цепь – контактные и бесконтактные;
- по роду величины, на которую реагирует реле, – токовые, напряжения, мощности, частоты;
- по конструктивному исполнению – открытые, с защитным чехлом, пылегазозащищенные.

Из электрических реле широко используются электромеханические, магнитные и электронные. Реле характеризуются следующими параметрами:

- мощностью срабатывания – минимальной мощностью, потребляемой реле при срабатывании;
- выходной, коммутируемой мощностью коммутируемого источника;
- временем срабатывания и временем отпускания реле;
- коэффициентом возврата реле $K_v = x_{\text{ср}}/x_{\text{отп}}$, где $x_{\text{ср}}$ и $x_{\text{отп}}$ – значения срабатывания и отпускания реле;
- коэффициентом управления (усиления) реле $K_y = x_{\text{вых}}/x_{\text{ср}}$, где $x_{\text{вых}}$ – значение коммутируемой величины тока, напряжения, мощности и т. д.

На базе дискретных элементов строится большое количество дискретных устройств в виде программно-логических схем управления, счетчиков, регистров, цифровых сумматоров, запоминающих устройств, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, релейно-импульсных регуляторов, микроконтроллеров.

7.1.1. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи применяются в системах с цифровыми регуляторами и системах прямого цифрового управления с управляющими вычислительными машинами и микропроцессорами [4].

Аналого-цифровой преобразователь – это кодирующий преобразователь, в котором осуществляется квантование сигнала по уровню и времени. Принцип преобразования электрического аналогового

сигнала в код заключается в следующем. Пусть какой-то датчик формирует выходной сигнал в виде напряжения, изменяющегося непрерывно во времени. Весь диапазон возможных значений сигнала в виде входного напряжения на АЦП $U_{вх}$ разбивают на уровни. Расстояние между уровнями берется одинаковым и называется шагом квантования. Каждому уровню присваивается код, обычно двоичный. Число уровней равно 2^n , где n – разрядность кода. На рис. 7.1 приведен пример, когда $n = 3$, т. е. имеются восемь уровней квантования.

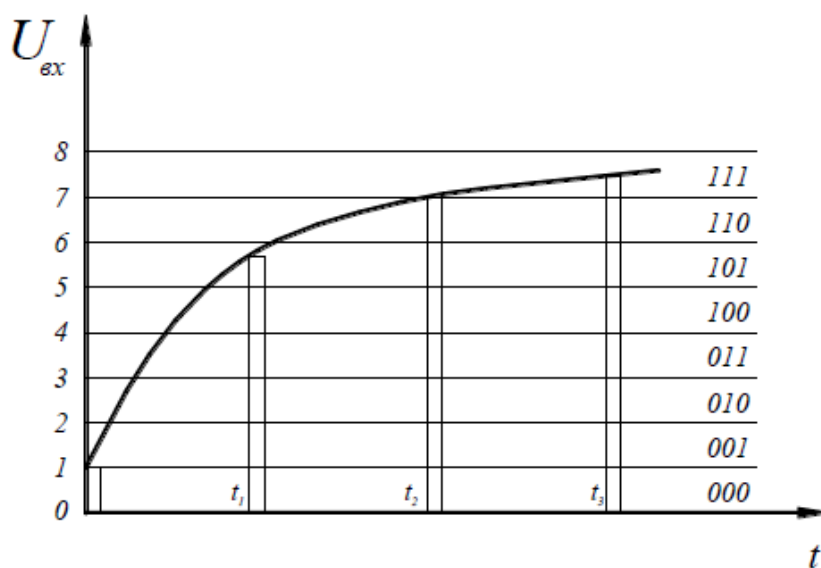


Рис. 7.1. Кодирование аналогового сигнала

В момент времени $t = 0$ напряжение на выходе датчика имеет значение, находящееся между первым и вторым уровнями, что соответствует ближайшему нижнему уровню – значению кода 001. В момент следующего опроса t_1 ($T_{опр}$ – время между очередными опросами) напряжение соответствует пятому уровню, код которого 101. В моменты времени t_2 и t_3 напряжение равно шестому и седьмому уровням, что соответствует кодам 110 и 111. Таким образом, АЦП формирует и передает на дальнейшую обработку коды уровней напряжения на выходе датчика в моменты опроса. Чем больше в преобразователе уровней, тем меньше шаг квантования и тем точнее преобразование сигнала, снимаемого с датчика.

При наличии 2^n уровней квантования относительная погрешность квантования составит $\delta = 2^{-n}$. Например, при восьмиразрядном коде, т. е. при 256 уровнях квантования, относительная погрешность

в момент опроса составит $1/256-0,4\%$. Задавшись относительной погрешностью, можно рассчитать разрядность преобразователя.

По принципу получения кода АЦП можно разделить на два типа – последовательного и разрядного кодирования. В АЦП последовательного кодирования код изменяется до требуемого значения ступеньками и для кодирования применяется счетчик, который суммирует счетные импульсы. В АЦП разрядного типа во время каждого такта работы преобразователя кодируются несколько или сразу все разряды кода, для чего используются регистры и шифраторы. В свою очередь, АЦП последовательного типа могут быть балансными и небалансными. Рассмотрим один из вариантов схемы небалансного АЦП последовательного типа (рис. 7.2).

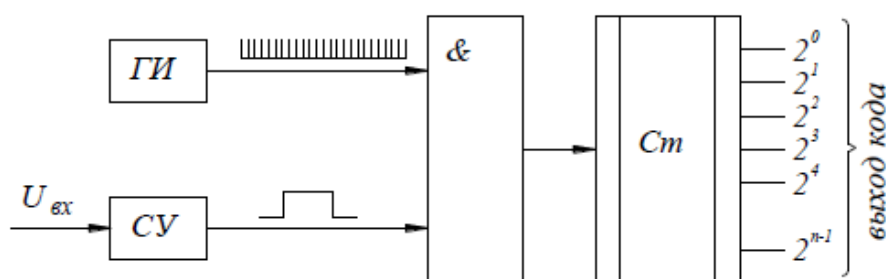


Рис. 7.2. Схема небалансного АЦП последовательного типа

На вход схемы подается напряжение $U_{вх}$, преобразуемое с помощью времяимпульсного преобразователя (ВИП) в импульс напряжения, длительность которого $t_{и}$ пропорциональна среднему значению напряжения $U_{вх}$. В период $t_{и}$ действия импульса схема совпадения $\&$ открыта и на вход двоичного статического счетчика (Ст) поступают импульсы высокой частоты от высокочастотного генератора импульсов (ГИ). Состояние каждого триггера счетчика Ст соответствует разряду двоичного числа ($2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-1}$). При поступлении за время $t_{и}$ на вход счетчика N импульсов триггеры счетчика принимают определенные состояния, характеризующие двоичное число, пропорциональное входному напряжению.

Рассмотренный АЦП не содержит обратной связи по выходу, т. е. по коду, поэтому преобразователь такого типа называется небалансным.

Схема балансного аналого-цифрового преобразователя изображена на рис. 7.3.

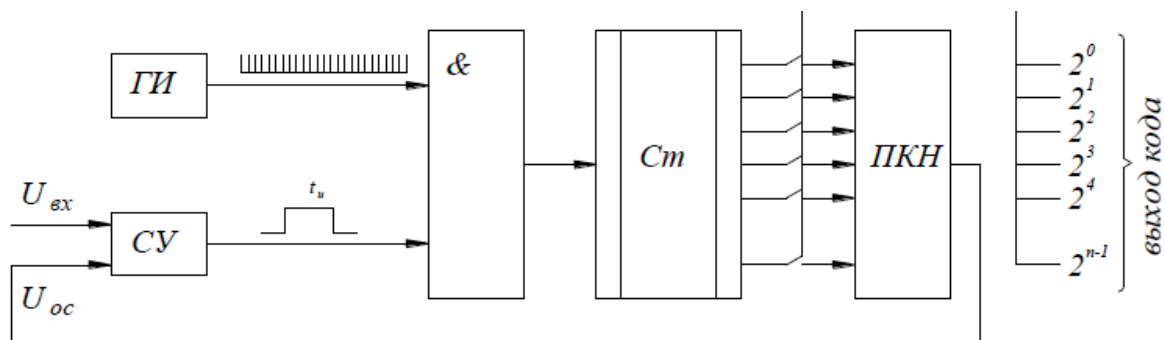


Рис. 7.3. Схема балансного преобразователя

Преобразователь кода в напряжение ПКН, включенный на выходе счетчика Ст, преобразует код, снимаемый со счетчика, в напряжение обратной связи $U_{о.с.}$, пропорциональное коду. При равенстве напряжений $U_{вх}$ и $U_{о.с.}$ сравнивающее устройство (СУ) прекратит подачу импульса на схему совпадения $\&$, в результате чего перестанут поступать импульсы на вход счетчика, так как схема совпадения будет заперта. В этот момент код, снимаемый с выхода счетчика, будет пропорционален входному напряжению $U_{вх}$.

7.1.2. Цифроаналоговые преобразователи

Цифроаналоговые преобразователи предназначены для преобразования кодированного сигнала в аналоговый эквивалент. Принцип действия ЦАП основан на сложении аналоговых составляющих, пропорциональных некоторым двоичным приращениям исходного двоичного числа. По принципу получения аналоговых величин ЦАП можно разделить на два типа: суммирование единичных приращений аналоговых величин, пропорциональных каждому импульсу; суммирование единичных приращений аналоговых величин с учетом веса разряда двоичного кода. В первом случае исходное число преобразуется в число-импульсный код, т. е. в соответствующее число импульсов. Затем каждому из этих импульсов ставится в соответствие постоянное единичное приращение аналоговой величины. Все приращения суммируются, в результате чего на выходе получается аналоговая величина, т. е. эквивалент исходного кода. Во втором случае для каждого разряда преобразуемого кода подбирается эталонное значение аналоговой величины, соответствующее весу данного разряда. В процессе преобразования суммируются эталоны тех разрядов двоичного кода, в которых стоит «1». Эталонные,

соответствующие разрядам кода с нулевым значением, в сложении не участвуют.

На рис. 7.4 показан упрощенный пример схемы преобразователя двоичного кода в напряжение.

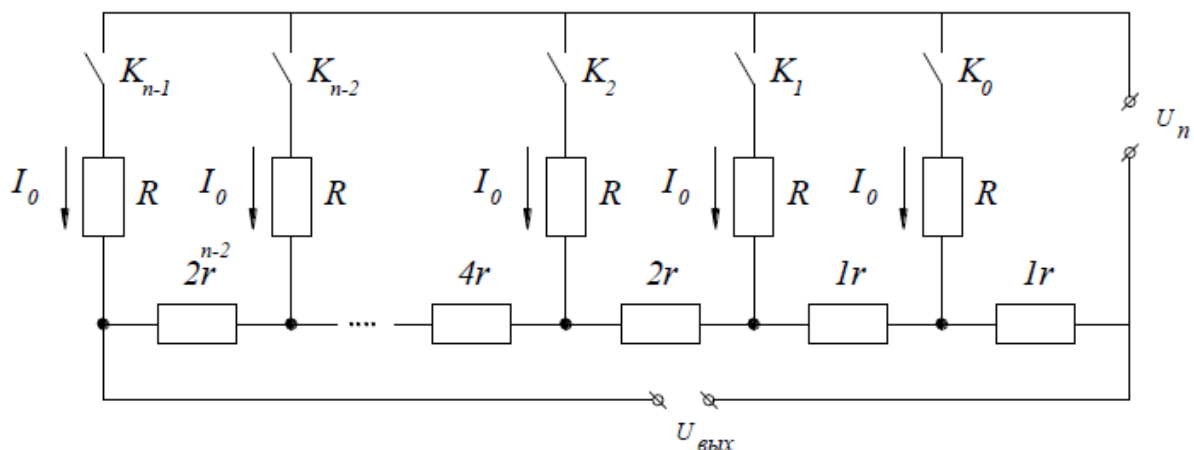


Рис. 7.4. Вариант схемы преобразователя двоичного кода в напряжение

Схема основана на принципе суммирования токов I_0 , пропорциональных весу разрядов двоичного кода. Ключи $K_0, \dots, K_{n-1}$ этой схемы управляются от триггеров счетчика или регистра, с которого снимается преобразуемый код. Ключи $K_0, \dots, K_{n-1}$ в виде контактов на схеме показаны условно. В действительности это бесконтактные ключи, которые при наличии «1» в разрядах кода замыкают соответствующую цепь, а при «0» – размыкают, т. е. при нулевых значениях разрядов преобразуемого кода ключи открыты, при единичных – закрыты. Резисторы R и r в этой схеме эталонные, т. е. высокоточные, причем $R \gg r$. Источник питания U_n стабилизирован. Токи I_0 , проходящие через резисторы R , создают на резисторах $1r, 2r, \dots, 2^{n-2}r$ падение напряжения $U_{вых}$, пропорциональное преобразуемому коду. Благодаря тому, что сопротивления на резисторах $1r, 2r, \dots, 2^{n-2}r$ удваиваются в зависимости от веса разряда кода, подключающего код I_0 , напряжение на выходе будет пропорционально значению преобразуемого кода. Например, число разрядов кода $n = 3$; преобразуемый код $[101]_2 = [5]_{10}$, т. е. 101 в двоичной системе исчисления соответствует 5 в десятичной системе. Код 101 соответствует замкнутым ключам K_0, K_2 и ра-

замкнутому ключу K_1 . По условию $R \gg r$, поэтому можно считать, что ток I_0 одинаков во всех разрядах:

$$U_{\text{вых}} = I_0 (2^1 r + 2^0 r + r) + I_0 r = 5[I_0 r].$$

Сигнал на выходе ЦАП формируется в виде отдельных ступенек, высота которых определяется разрядом кода. Для получения «гладкого» выходного сигнала достаточно на выходе ЦАП поставить высокочастотный фильтр, который сгладит высшие гармоники ступенчатого сигнала.

7.2. Формализация условий работы дискретных управляющих устройств

Основными задачами синтеза автоматических программно-логических схем управления на дискретных элементах являются:

а) разработка структуры автоматического устройства и составление переключательной схемы, реализующей разработанную структуру; составление на основании заданных условий работы автоматического устройства структурной формулы, описывающей работу этого устройства;

б) минимизация полученной структурной формулы при помощи специальных методов логического синтеза структур программно-логических систем;

в) составление на основании минимизированного уравнения конечной структуры системы управления и сигнализации (сама структура реализуется на базе релейных контактных и бесконтактных схем и логических элементов).

Математическим аппаратом исследования таких систем является символический аппарат двузначной логики (алгебра Дж. Буля).

8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Строительство всех промышленных предприятий, в том числе и холодильных, ведется в соответствии с проектом. Проект представляет собой комплекс технической документации, позволяющий воспроизвести в натуре проектируемый объект, полностью отвечающий технологическим, организационным и экономическим требованиям. В зависимости от сложности и характера проектируемого объекта проект может включать в себя следующие части:

- технико-экономическую;
- технологическую;
- строительную;
- энергоснабжение;
- автоматизацию;
- сантехническую;
- организацию строительства;
- сметную документацию.

Важнейшим вопросом проекта является его комплексность, т. е. увязка всех его частей и элементов в единое целое. Один из важнейших разделов – проект автоматизации технологических процессов, который разрабатывается во взаимосвязи с проектом системы управления предприятием и со всеми другими разделами общего комплексного проекта. Проекты автоматизации разрабатываются отраслевыми (проектными) институтами либо специализированными проектными организациями, работающими в области автоматизации.

Основным принципом автоматизации производства является достижение органической взаимосвязи системы автоматизации с технологическим оборудованием и организацией данного производства. Разработка проекта автоматизации производится на основе технического задания на проектирование, которое составляет заказчик или организация, выполняющая технологическую часть проекта.

Проектирование систем автоматизации состоит из двух стадий:

- 1) разработки технического проекта;
- 2) выполнения рабочих чертежей после утверждения заказчиком технического проекта.

В отдельных случаях для малых предприятий возможна одна стадия проектирования – разработка технорабочего проекта.

В состав проекта на стадии разработки технического проекта входит техническая документация в виде чертежей, пояснительной записки и заявочной ведомости.

Чертежи включают в себя:

- технологическую схему проектируемого объекта;
- функциональную схему автоматизации технологического процесса;
- общие виды щитов и пультов управления;
- расположение щитов и пультов на плане объекта.

В пояснительной записке указываются:

- характеристика объекта автоматизации;
- основные решения по автоматизации производственных процессов;
- материально-технические средства автоматизации;
- результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и экспериментальных работ;
- технико-экономическое обоснование системы автоматизации.

В заявочные ведомости вносятся:

- типы приборов и средств автоматизации;
- типоразмеры щитов и пультов управления;
- основные монтажные материалы (кабели, провода, зажимы, трубы);
- нестандартное оборудование.

Одним из важных документов на стадии проектирования системы автоматизации является функциональная схема автоматизации.

8.1. Составление функциональных схем систем автоматизации технологических процессов

Функциональная схема системы автоматизации технологических процессов – технический документ, определяющий структуру и уровень автоматизации технологического процесса и оснащения его приборами и средствами автоматизации. Функциональная схема – это чертеж, на котором условными обозначениями показаны технологическое оборудование, органы управления, приборы и средства автоматизации с указанием связей между элементами технологического оборудования и приборами, средствами автоматизации. Технологическую схему вычерчивают с упрощенным изображением оборудования, масштаб при этом выбирается произвольный. Кон-

фигурация оборудования должна соответствовать принятым условным обозначениям.

Форма листа, подготовленного для составления функциональной схемы, условно делится на три части, причем в верхней 2/3 части листа располагается технологическое оборудование с первичными преобразователями (датчиками), установленными на элементах оборудования, и исполнительными механизмами (вентильми, клапанами, задвижками, электроприводами и т. д.). В нижней трети листа составляется таблица с приборами и средствами автоматизации, взаимосвязь между которыми указывается в самой таблице, а их связь с устройствами автоматизации на технологическом оборудовании показывается тонкими линиями. Возможен разрыв соединительных линий у таблицы, в этом случае делается одноименная оцифровка линий приборов, расположенных в таблице, и соответствующих им приборов (датчиков и исполнительных механизмов), расположенных на технологическом оборудовании.

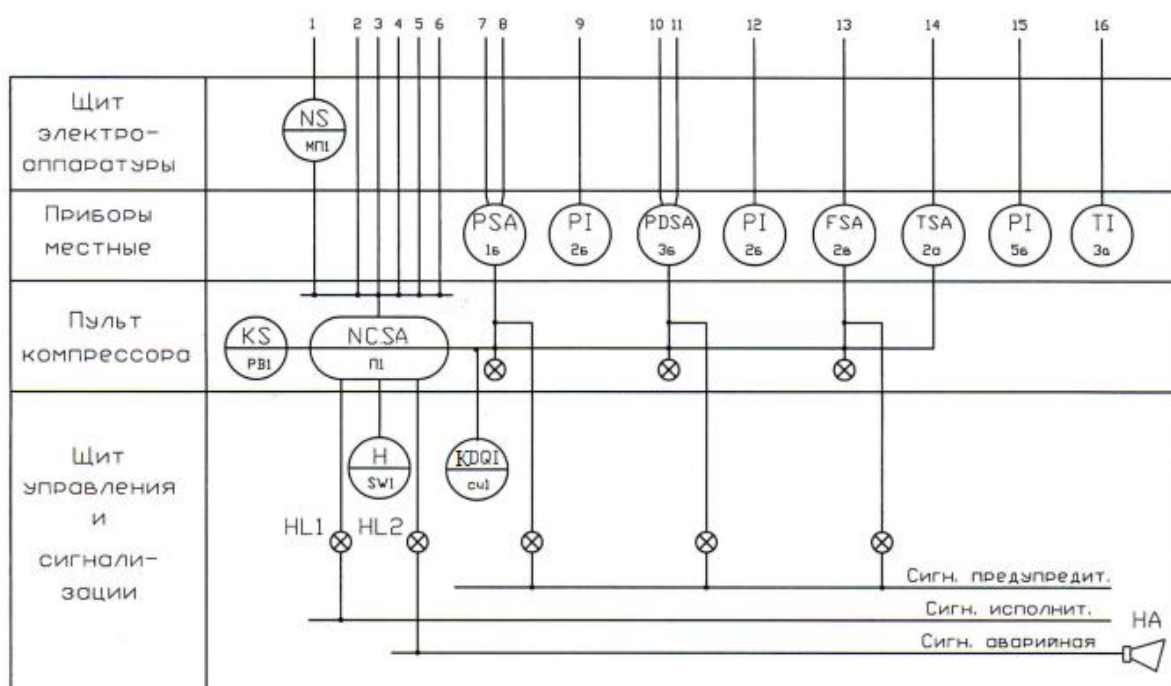
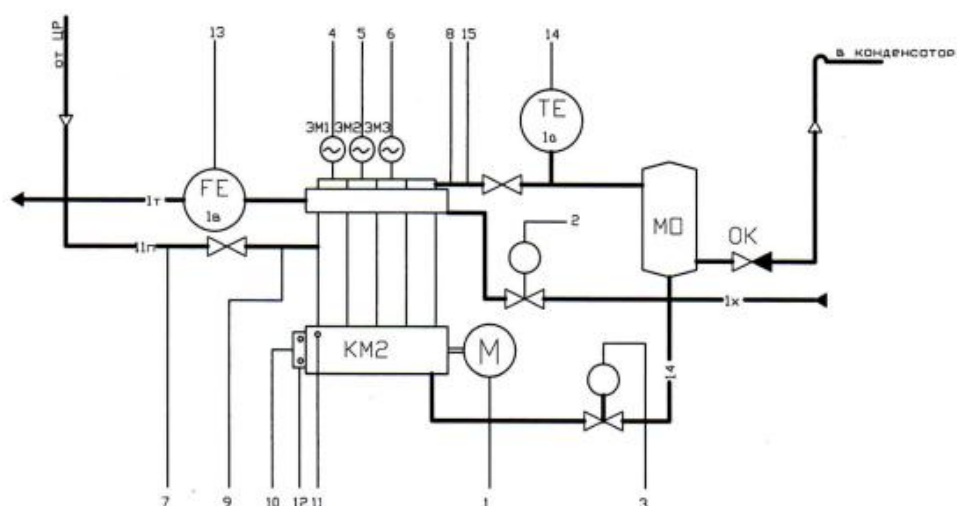
Для холодильного оборудования рекомендуется следующий порядок расположения обозначений приборов в таблице сверху вниз по строкам (рис. 8.1):

а) щит электроаппаратуры, где в условных обозначениях показывается пусковая аппаратура для управления электродвигателями (включение и выключение насоса, привода компрессора, открытие или закрытие задвижки, вентиля и т. д.); обычно в этой строке показывается магнитный пускатель;

б) приборы местные – в условных обозначениях показываются все приборы и средства автоматизации, установленные на элементах технологического оборудования, кроме датчиков и исполнительных механизмов; обозначаются местные измерительные приборы (термометры, манометры, терморегулирующие вентили, расходомеры и т. д.), местные регулирующие и блокирующие приборы, приборы защиты (реле давления, термореле, реле протока и др.);

в) пульт компрессора – в этой строке изображается реле времени, пульт компрессора, на который поступают сигналы от местных приборов и в зависимости от содержания их информации формируется сигнал на включение или выключение исполнительных механизмов, что сопровождается световой сигнализацией – лампочками или светодиодами на пульте;

Описание функциональной схемы будет приведено далее.

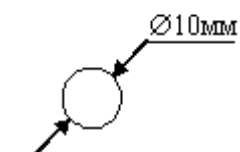


182

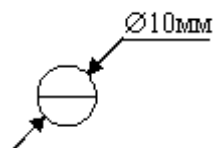
Условные обозначения приборов и средств автоматизации, применяемые на функциональных схемах, включают графические, буквенные и цифровые обозначения (ГОСТ 21.404–85).

В верхней половине графического обозначения наносят буквенное обозначение преобразуемой величины и функциональные признаки прибора, определяющие его назначение. В нижней части графического обозначения наносят цифровое (позиционное) обозначение прибора или комплекта средств автоматизации.

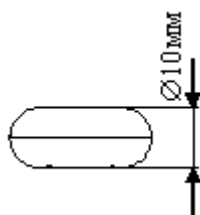
8.1.1. Графическое обозначение приборов



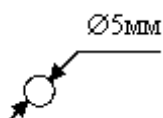
1. Прибор, устанавливаемый вне щита (по месту).



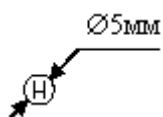
2. Прибор, установленный на пульте или щите.



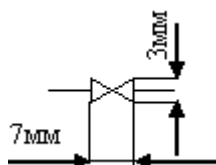
3. Допускаемое обозначение для многофункционального прибора, установленного на пульте или щите.



4. Общее обозначение исполнительного механизма.



5. Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом.



6. Регулирующий орган.



7. Пересечение линий связи без соединения друг с другом.



8. Пересечение линий с соединением между собой.

8.1.2. Буквенные обозначения приборов

Порядок расположения букв в буквенном обозначении такой: на первом месте стоит буква основного обозначения преобразуемой величины, а на следующих местах – буквы, обозначающие функциональные признаки прибора. В некоторых случаях на втором месте могут стоять буквы (*D*, *F*, *Q*), выполняющие функции дополнительного обозначения, уточняющего преобразуемую величину, обозначенную первой буквой:

D – плотность; если буква стоит на втором месте, то она означает разность, перепад параметра, обозначенного первой буквой; например, *PD* – перепад давления;

E – любая электрическая величина: ток, напряжение, мощность и т. д.;

G – размер, положение, перемещение;

F – расход; если буква стоит на втором месте, то она означает соотношение, долю параметра, обозначенного первой буквой; например, *FF* – соотношение расходов двух сред;

K – время, временная программа;

L – уровень;

M – влажность;

P – давление, вакуум;

Q – величина, характеризующая качество (состав, концентрация и т. д.), причем символ качества ставится справа вверху у графического изображения прибора (проценты, *PH* – кислотность, *O₂* – кислород и т. д.). Если буква *Q* стоит на втором месте, то она означает суммирование, интегрирование во времени параметра, обозначенного первой буквой; например, *FQ* – счетчик расхода;

R – радиоактивность;

S – скорость (линейная, угловая); частота;

T – температура;

V – вязкость;

W – масса;

B, *N*, *Y*, *Z* – резервные буквы, обозначающие параметры, не вошедшие в вышеприведенный перечень. Применение резервных букв должно быть расшифровано на схеме.

На втором и последующих местах (за исключением букв *D, F, Q*) буквы обозначают функциональное назначение прибора, причем они должны идти в строгой последовательности, а именно: *I, R, C, S, A*, где:

I – прибор показывающий (цифровая или стрелочная индикация);

R – прибор, регистрирующий любой информационный носитель;

C – прибор регулирующий (независимо от закона регулирования);

S – обозначает контактное устройство прибора, используемого только для включения, отключения, переключения, блокировки;

A – прибор со световой или звуковой сигнализацией.

При построении буквенных обозначений указывают не все возможные функциональные признаки прибора, а лишь те, которые используют в данной схеме.

Предельные значения измеряемых величин, по которым осуществляются включение, отключение, блокировка, сигнализация, допускается конкретизировать добавлением букв «*H*» (верхнее значение) и «*L*» (нижнее значение) справа у графического изображения прибора сверху и снизу.

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 *H*.

8.1.3. Буквенные обозначения дополнительных функциональных признаков приборов, преобразователей сигналов и вычислительных устройств

К числу дополнительных буквенных обозначений, кроме указанных в подразд. 8.1.2, относятся буквы, характеризующие вид обработки параметра, обозначенного первой буквой. Как правило, такие приборы обозначаются всего двумя буквами: первая буква – обрабатываемый параметр, вторая – вид обработки:

E – чувствительный элемент; эти устройства выполняют первичное преобразование параметра, обозначенного первой буквой; обозначается на элементах технологического оборудования;

T – дистанционная передача сигнала от датчика, установленного на элементе технологического оборудования; это бесшкальные устройства, передающие сигнал от соответствующего датчика на вторичный прибор; обозначаются на таблице приборов в строке «приборы местные»;

Y – энергетическое, математическое или видовое преобразование сигнала, причем вид преобразования показывается справа сверху у графического изображения прибора.

Буквенные обозначения видов преобразования сведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

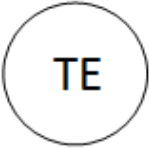
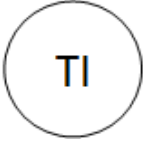
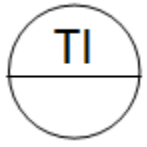
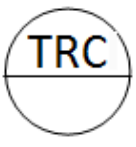
Обозначения преобразований

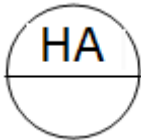
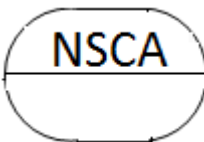
Наименование вида преобразования	Обозначение
1. Род энергии сигнала: электрический пневматический гидравлический	E P G
2. Виды формы сигнала: аналоговый дискретный	A D
3. Операции, выполняемые вычислительным устройством: суммирование умножение сигнала на постоянный коэффициент перемножение двух и более сигналов друг на друга возведение величины сигнала f в степень « n » деление сигналов друг на друга извлечение из величины сигнала корня степени « n » логарифмирование дифференцирование интегрирование изменение знака сигнала ограничение верхнего и нижнего сигналов	Σ K X f^n $:$ $\sqrt[n]{}$ $\lg$ dx/dt $\int$ $x(-1)$ $\max, \min$
4. Связь с вычислительным комплексом: передача сигнала на ЭВМ вывод сигнала с ЭВМ	Bi Bo

Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Примеры условных обозначений

№	Обозначение	Наименование или назначение
1		Первичный преобразователь (чувствительный элемент) для преобразования температуры в другой физический параметр; установлен по месту. Например, термометр сопротивления, термopара, термобаллон и т. д.
2		Прибор для измерения температуры, показывающий; установлен по месту, например, ртутный термометр
3		Прибор для измерения температуры, показывающий; установлен на щите или пульте; например, автоматический мост
4		Прибор для автоматической регистрации температуры, регулирующий; установлен на щите
5		Прибор для измерения перепада давления, показывающий; установлен по месту
6		Прибор для измерения давления (вакуума), бесшкальный, с дистанционной передачей показаний; установлен по месту

№	Обозначение	Наименование или назначение
7		Прибор для измерения давления (разрежения), показывающий, с контактным устройством; установлен по месту; например, электроконтактный манометр
13		Пусковая аппаратура для управления электродвигателем; например, магнитный пускатель
14		Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления, снабженная устройством сигнализации; установлена на щите; например, кнопка со встроенной лампочкой
15		Пульт, воспринимающий и формирующий информацию регулирования, сигнализации, блокировки, защиты, включения и выключения исполнительных механизмов; например, пульт компрессора

8.2. Пример составления функциональной схемы

На рис. 8.1 изображена функциональная схема измерения, регулирования и защиты от опасных режимов работы аммиачного поршневого компрессора холодильной установки.

Защита компрессора от недопустимого повышения давления нагнетания и от недопустимого понижения давления всасывания предусмотрена посредством двухблочного реле давления (поз. 1б). Одновременно текущее давление паров аммиака на всасывающем и нагнетательном трубопроводах измеряется манометрами (поз. 2б и 5б). При выходе значений давления за допустимые пределы сигнал от реле давления поступает на пульт компрессора П1, который через магнитный пускатель МП1 обеспечивает выключение электропривода М компрессора КМ1.

В приведенной функциональной схеме предусмотрено облегчение пуска многоцилиндрового компрессора путем отжатия всасывающих клапанов компрессора электромагнитами ЭМ1–ЭМ3. При остановке компрессора его всасывающие клапаны отжимаются электромагнитами. При пуске компрессора реле времени РВ1, расположенное на пульте компрессора, через 10–15 с после запуска электропривода формирует управляющий сигнал на отпуск всасывающих клапанов электромагнитами ЭМ1–ЭМ3 и компрессор входит в нормальный режим работы.

Защиту от недопустимого повышения температуры нагнетаемого пара обеспечивает термореле «2а», чувствительный элемент «1а» которого смонтирован на нагнетательном трубопроводе компрессора. Установка на термореле должна быть на 10–15 % выше максимальной рабочей температуры нагнетания.

Реле протока «2в» обеспечивает защиту компрессора от недостаточной подачи воды в охлаждающую рубашку. Реле протока установлено на сливном водяном трубопроводе и при уменьшении подачи охлаждающей воды до 30 % от нормального расхода компрессор должен отключиться. Управление подачей охлаждающей воды предусмотрено с помощью электромагнитного вентиля ЭМВ1.

Защита от нарушений в системе смазки движущихся частей компрессора предусмотрена установкой реле разности давлений «3б» (реле контроля смазки – РКС). Этот вид защиты применяют у компрессоров с принудительной системой смазки от масляного насоса. Реле контроля смазки реагирует на изменение разности давлений в масляном трубопроводе после насоса и в картере компрессора. Если разность давлений понижается до предельной, то РКС «3б» через магнитный пускатель МП1 электропривода останавливает компрессор. При пуске компрессора контакты РКС блокируют на 10–15 с реле времени РВ1, так как этого времени достаточно для восстановления нормальной циркуляции масла.

Счетчик времени «Сч.1» обычно ставится для отсчета времени работы компрессора, чтобы своевременно обеспечивать соответствующие профилактические работы с основным холодильным оборудованием. Для визуального наблюдения за текущими значениями основных параметров холодильной машины по месту поставлены показывающие манометры «2б», «4б», «5б» и стеклянный ртутный термометр на нагнетательной стороне компрессора «3а».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Васильев Д.В., Чуич В.Г.** Системы автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1967.
2. Холодильные машины: Учеб. / А.В. Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И. Пекарев, Л.С. Тимофеевский. – СПб.: Политехника, 2006.
3. **Благовещенская М.М., Злобин Л.А.** Информационные технологии систем управления технологическими процессами. – М.: Высш. шк., 2005.
4. **Бородин И.Ф., Судник Ю.А.** Автоматизация технологических процессов. – М.: Колос, 2004.
5. **Бородин И.Ф., Рысс А.А.** Автоматизация технологических процессов. – М.: Колос, 1996.
6. **Курылев Е.С., Герасимов Н.А.** Холодильные установки. – М.: Машиностроение, 1970.
7. **Голянд М.М., Малеванный Б.Н.** Холодильное технологическое оборудование. – М.: Пищ. пром-сть, 1977.
8. **Данин В.Б., Пастухов А.С.** Разработка системы стабилизации параметров процесса охлаждения хлебобулочных изделий в автоматизированной системе управления технологическим процессом хлебопекарного производства. Параметрическая схема объекта управления // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 2. С. 48.
9. **Егупова Н.Д.** Методы классической и современной теории автоматического управления. – М.: Колос, 2004.
10. **Курылев Е.С., Яновский С.И.** Основы автоматизации холодильных установок: Учеб. пособие. – Л.: ЛТИХП, 1975.
11. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967.
12. **Лапшин А.А.** Основы комплексной автоматизации технологических процессов мясной и молочной промышленности. – М.: Пищ. пром-сть, 1969.
13. Автоматика и автоматизация производственных процессов мясной и молочной промышленности / В.В. Митин и др. – М.: Агропромиздат, 1987.
14. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977.

15. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования / А.Д. Нестеренко и др. – Киев: Наук. думка, 1976.

16. **Полевой А.А.** Монтаж холодильных установок и машин. – СПб.: Профессия, 2010.

17. **Клюев А.С.** Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. – М.: Энергия, 1967.

Дополнительная

Данин В.Б., Каткова В.А., Пастухов А.С. Автоматизированные комплексы технологической подготовки производства: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

Danin V., Pastukhov A. Model development for fresh baked bread natural and forced cooling // Proceedings of the 6-th Conference on Food Science and Technology “Innovations for Food Science and Production” FOODBALT – Jelgava, Latvia, – 2011. – P. 209–214. ISBN 978-9984-48-045-9.

Загинайлов В.И., Шеповалова Л.Н. Основы автоматики. – М.: Колос, 2001.

Перов В.Л. Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1970.

Полевой А.А. Автоматизация холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. – СПб.: Профессия, 2007.

Польман. Учебник по холодильной технике. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.

Селевцов Л.И., Стегаличев Ю.Г. Датчики и приборы для измерения давления: Метод. указания. – Л.: ЛТИХП, 1977.

Селевцов Л.И., Страхов И.С. Датчики и приборы для измерения уровня: Метод. указания. – Л.: ЛТИХП, 1983.

Селевцов Л.И., Стегаличев Ю.Г. Электрические исполнительные механизмы: Метод. указания. – Л.: ЛТИХП, 1981.

Селевцов Л.И., Стегаличев Ю.Г. Пневматические исполнительные механизмы: Метод. указания. – Л.: ЛТИХП, 1983.

Стегаличев Ю.Г., Васильев А.И. Технические средства автоматизации для перерабатывающих производств Агропрома: Учеб. пособие. – СПб.: ЛТИХП, 1992.

Стегаличев Ю.Г., Балюбаш В.А., Замарашкина В.Н. Технологические процессы пищевых производств. – Ростов н/Д: Феникс, 2006.

Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов тепло-энергетических процессов. – М.: Энергия, 1972.

Измерители ПИД-регуляторы (ТРМ-12): Техническое описание и инструкция по эксплуатации: АРК Энергосервис.

Компоненты автоматизации / Каталог ОВЕН 2009, НПО ОВЕН, www.owen.ru. Электронные системы управления Ador-Kool. М.: ЗАО «Данфосс», 2006.

Преобразователь измерительный Сапфир-22: Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

Рекомендации по проектированию автоматизации аммиачных холодильных установок с различными системами охлаждения: Отраслевой каталог. – М.: ВНИХИ, 1974.

Технические средства автоматизации: Отраслевой каталог ОРЛЕКС: Орел.

Устройства автоматики и управления холодильных установок и систем кондиционирования воздуха: Отраслевой каталог RK.00.H3.50.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
1.1. Объемы автоматизации.....	4
1.2. Цель автоматизации холодильных систем	5
1.3. Основные системы автоматизации.....	5
1.3.1. Система автоматического контроля.....	6
1.3.2. Система автоматической защиты	6
1.3.3. Система автоматической сигнализации.....	7
1.3.4. Система автоматической блокировки	8
1.3.5. Система операторного дистанционного управления	9
1.3.6. Система автоматического регулирования и управления	9
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ	11
2.1. Классификации систем регулирования.....	12
2.1.1. Классификация по принципу регулирования.....	12
2.1.2. Классификация по числу регулируемых параметров.....	13
2.1.3. Классификация по назначению	14
2.1.4. Классификация по характеру регулирующих воздействий.....	14
2.1.5. Классификация по виду статической характеристики регулятора	14
2.2. Уравнения статики и динамики автоматических систем Понятия о передаточных функциях	15
2.2.1. Уравнение статики	15
2.2.2. Уравнение динамики	15
2.3. Типовые динамические звенья систем автоматического регулирования.....	18
2.3.1. Безынерционные звенья	18
2.3.2. Инерционные звенья (звенья с самовыравниванием)	19
2.3.3. Колебательные звенья.....	22
2.3.4. Астатические (интегрирующие) звенья.....	23
2.3.5. Звено транспортного запаздывания	24

2.4. Основные правила соединения динамических звеньев.....	25
2.4.1. Последовательное соединение звеньев.....	25
2.4.2. Параллельное соединение звеньев	25
2.4.3. Встречно-параллельное включение звеньев	26
2.5. Математические модели объектов управления и методы их получения	26
2.6. Частотные характеристики динамических звеньев	31
2.6.1. Апериодическое звено I порядка.....	32
2.6.2. Апериодическое звено II порядка	33
2.6.3. Звено с запаздыванием	34
2.7. Понятие об устойчивости САР	35
2.7.1. Критерий Найквиста	35
2.7.2. Критерий Михайлова.....	36
3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ.....	41
3.1. Классификация технических средств автоматизации	41
3.1.1. Классификация по назначению в системе управления	42
3.1.2. Классификация по виду используемой энергии	42
3.2. Государственная система приборов	43
3.3. Метрологические характеристики измерительных приборов	45
3.4. Приборы для преобразования и измерения температуры.....	45
3.4.1. Термометры расширения.....	46
3.4.2. Манометрические термометры.....	49
3.4.3. Электрические приборы	49
3.4.4. Термоэлектрические преобразователи (термопары)	51
3.4.5. Полупроводниковые датчики измерения температуры	53
3.4.6. Подключение датчиков с унифицированным выходным сигналом тока или напряжения	54
3.5. Приборы для измерения давления	55
3.5.1. Классификация манометрических приборов	56
3.5.2. Устройство и принцип действия основных типов манометрических приборов	57
3.5.3. Измерительный преобразователь «Сапфир-22»	60

3.5.4. Сильфонные манометры.....	63
3.5.5. Манометры с мембранной коробкой.....	64
3.5.6. Жидкостные приборы для измерения давления и перепада давления.....	65
3.6. Датчики и приборы для измерения количества и расхода жидкостей и газов	70
3.6.1. Скоростные счетчики количества	71
3.6.2. Объемные счетчики количества	72
3.6.3. Расходомеры переменного перепада давления.....	74
3.6.4. Расходомеры постоянного перепада давления	76
3.6.5. Электромагнитные расходомеры	78
3.6.6. Ультразвуковой расходомер	79
3.7. Приборы для измерения уровня жидкости в сосудах.....	80
3.7.1. Кондуктометрические сигнализаторы уровня	81
3.7.2. Емкостной сигнализатор уровня	82
3.7.3. Емкостной индикатор уровня	84
3.7.4. Реле уровня полупроводниковые ПРУ-5.....	85
3.8. Газоанализаторы.....	87
3.9. Автоматические регуляторы	90
3.9.1. Основные требования, предъявляемые к регуляторам	92
3.9.2. Основные законы регулирования и параметры настройки регуляторов	94
3.9.3. Двухпозиционный закон регулирования и двухпозиционные регуляторы	97
3.9.4. Аппаратные средства микропроцессорной техники	105
3.9.5. Позиционные регуляторы давления.....	127
3.9.6. Автоматические регуляторы температуры позиционного действия	130
3.9.7. Пропорциональные регуляторы температуры	133
3.9.8. Автоматические регуляторы уровня	135
4. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ	140

5. СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ	148
6. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	158
6.1. Электродвигательные исполнительные механизмы	159
6.1.1. Исполнительные механизмы двухпозиционного регулирования типа ДР	160
6.1.2. Исполнительные механизмы пропорционального регулирования типа ПР	161
6.1.3. Исполнительные механизмы типа МЭО.....	163
6.2. Электромагнитные исполнительные механизмы.....	164
6.3. Пневматические исполнительные механизмы	165
6.3.1. Позиционные пневматические исполнительные механизмы.....	166
6.3.2. Функциональные пневматические исполнительные механизмы.....	168
7. ОСНОВЫ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМ ПРОГРАММНО- ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	171
7.1. Дискретные устройства автоматики.....	172
7.1.1. Аналого-цифровые преобразователи	173
7.1.2. Цифроаналоговые преобразователи.....	176
7.2. Формализация условий работы дискретных управляющих устройств	178
8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	179
8.1. Составление функциональных схем систем автоматизации технологических процессов	180
8.1.1. Графическое обозначение приборов.....	183
8.1.2. Буквенные обозначения приборов	184
8.1.3. Буквенные обозначения дополнительных функциональных признаков приборов, преобразователей сигналов и вычислительных устройств	185
8.2. Пример составления функциональной схемы	188
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	190

Данин Владимир Борисович
Данин Владимир Владимирович
Малышев Александр Александрович
Мамченко Валерий Олегович

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Подписано в печать 31.08.2015. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 11,63. Печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 12,25
Тираж 500 экз. Заказ № С 61

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9