МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области сельского хозяйства в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования I ступени по специальностям 1-74 05 01 Мелиорация и водное хозяйство, 1-74 04 01 Сельское строительство и обустройство территорий*

Горки
БГСХА
2020

УДК 631.672.2+628.1(075.8)
ББК 38.761.1(я73)
А18

*Рекомендовано методической комиссией мелиоративно-строительного факультета 19.02.2020 (протокол № 6) и Научно-методическим советом БГСХА 26.02.2020 (протокол № 6)*

Авторы:
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *Ю. Н. Дуброва*;
кандидат технических наук, доцент *Л. И. Кумачев*;
кандидат архитектуры, доцент *Р. А. Другомилов*;
доктор сельскохозяйственных наук, профессор *Ю. А. Мажайский*

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент *А. С. Анженков*;
кандидат технических наук, доцент *О. Н. Прокопеня*

А18 **Автоматизация инженерных систем** : учебно-методическое пособие / Ю. Н. Дуброва [и др.]. – Горки : БГСХА, 2020. – 414 с.
ISBN 978-985-7231-64-5.

В пособии изложены основы электротехники, приведены схемы устройств и принципы работы наиболее распространенных элементов и систем автоматизации технологических процессов при мелиорации земель и обустройстве сельских территорий. Приведены примеры различных схем, систем автоматики, широко использующихся в мелиоративном и сельском строительстве. Предназначено для студентов специальностей «Мелиорация и водное хозяйство» и «Сельское строительство и обустройство территорий». Также может быть полезным для специалистов, работающих в разных отраслях народного хозяйства.

Для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования I ступени по специальностям 1-74 05 01 Мелиорация и водное хозяйство, 1-74 04 01 Сельское строительство и обустройство территорий.

**УДК 631.672.2+628.1(075.8)**
**ББК 38.761.1(я73)**

**ISBN 978-985-7231-64-5**

© УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», 2020

## ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

***Автоматическое регулирование*** – это процесс автоматического поддержания параметра объекта на заданном уровне или изменения его по заданному закону.

***Автоматическая система*** управления – это совокупность управляющего устройства и объекта управления.

***Автоматическая сигнализация*** предназначена для оповещения обслуживающего персонала о нарушениях в технологическом процессе.

***Автоматическое измерение*** – это процесс автоматического определения значения физической величины в заданной точке объекта и передачи результата на регистрирующее или показывающее устройство.

***Автоматическая защита*** – это автоматическое выключение оборудования в результате возникших нарушений в технологическом процессе.

***Автоматическая блокировка*** – это автоматическое недопущение неправильного начала технологического процесса.

***Алгоритм управления*** – это последовательность выполнения операций, воздействующих на объект.

***Автоматизированный электропривод*** – это электропривод, в котором предусматривается выработка человеком только начального управляющего воздействия.

***Автоматический электропривод*** – это электропривод, в котором предусматривается участие человека только в надзоре за электромеханической системой.

***Абсолютная погрешность измерения*** – это разность между результатом измерения величины и ее действительным значением.

***Активные элементы цепи*** – это все источники электрической энергии и ряд приемников тока, для описания работы которых необходимо вводить *э.д.с.*

***Аналоговый прибор*** – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины.

***Величина (сила) электрического тока*** – это количество электричества (заряд), проходящее сквозь поверхность, равную поперечному сечению проводника, в единицу времени.

***Входной сигнал*** – это внешняя физическая величина, оказывающая воздействие на элемент автоматики.

***Выходной сигнал*** – это физическая величина, которая появляется на выходе элемента в результате преобразований в нем самом.

***Внутренний участок цепи*** – это ее участок, образуемый источником тока.

***Внешний участок цепи*** – это ее участок, образованный элементами-приемниками.

***Возмущение*** – это непланируемое изменение управляемой величины, характеризующей состояние объекта.

***Датчик*** – это элемент автоматики, измеряющий физическую величину и преобразующий ее в выходной сигнал.

***Двигатель*** – это устройство, преобразующее различные виды подводимой к нему энергии в механическую.

***Дифференциал реле*** – это разница значений порога срабатывания и порога отпускания реле.

***Емкость*** – это свойство элемента электрической цепи накапливать заряды и возбуждать ими электрическое поле.

***Заданная величина*** – это величина, характеризующая требуемое (или опасное) значение регулируемого или контролируемого параметра.

***Задатчик*** – это элемент автоматики, с помощью которого можно задать системе автоматически требуемое значение регулируемого или контролируемого параметра.

***Исходное состояние реле*** – это его состояние при отсутствии внешнего воздействия на него.

***Информационная автоматическая система*** – это система, в которой воздействие на объект формируется под влиянием информации, получаемой от датчиков.

***Исполнительный элемент*** – это устройство, непосредственно воздействующее на объект регулирования (управления).

***Интегрирующий прибор*** – это измерительный прибор, в котором подводимая к нему величина суммируется во времени.

***Измерительный преобразователь*** измеряет искомую величину и вырабатывает выходной сигнал в виде, удобном для передачи, обработки или хранения.

***Измерение*** – это процесс определения значения интересующей физической величины опытным путем.

***Индуктивность*** – это параметр элемента электрической цепи, преобразующего электрический ток в собственное магнитное поле.

***Источник питания*** – это элемент электрической цепи, предназначенный для генерирования электрической энергии.

***Контур электрической цепи*** – это любой замкнутый участок цепи.

***Кратковременный режим*** – это режим работы электродвигателя, при котором его температура во время работы не достигает установившегося значения, а во время паузы снижается до температуры окружающей среды.

***Комплексная автоматизация*** – это автоматизация всех операций технологического процесса, за исключением операций анализа его протекания и внесения поправок.

***Монтажная схема*** – это схема, на которой показаны соединения составных частей электроустановки, разводка проводов и кабелей, их сечения, способы прокладки, места соединения.

***Максимальная мощность внешней цепи*** – это мощность при условии равенства ее сопротивления внутреннему сопротивлению источника.

***Магнитный усилитель*** – это бесконечное электромагнитное устройство, предназначенное для управления мощностью, поступающей от источников в нагрузку.

***Мгновенное значение тока*** – это значение изменяющегося тока в рассматриваемый момент времени.

***Неавтоматизированный электропривод*** – это такой электропривод, в котором предусматривается участие человека в выработке управляющих воздействий.

***Нуль-орган*** – это сравнивающий элемент автоматики, воспринимающий на одном входе фактическую величину, а на другом – заданную величину сигнала и формирующий выходной сигнал, и его знак, как результат отличия двух входных сигналов.

***Номинальный режим источника*** – это его режим работы, при котором напряжение, ток и мощность его соответствует расчетным значениям.

***Несинусоидальный ток*** – это ток, закон изменения которого отличен от гармонического.

***Обратная связь*** – это связь между элементами автоматической системы в направлении от объекта к регулятору.

***Относительная погрешность измерения*** – это отношение абсолютной погрешности к значению измеренной величины.

***Пассивные элементы цепи*** – это элементы, которые не могут реализовать свои свойства без воздействия на них посторонних источников тока.

***Переменный ток*** – это электрический ток, величина и направление которого не остаются постоянными.

***Передаточный коэффициент*** – это отношение значения выходного сигнала элемента автоматики к значению входного сигнала.

***Периодические токи*** – это токи, мгновенные значения которых повторяются через определенные промежутки времени.

***Период*** – это наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенное значение тока повторяется.

***Прибор сравнения (блок сравнения)*** – устройство, сравнивающее величину измеренного параметра и его требуемого значения.

***Приемник электрической энергии*** – это элемент электрической цепи, использующий электрическую энергию.

***Принципиальная электрическая схема*** – это схема, составленная из элементов автоматики с изображением соединений между ними и путей прохождения тока.

***Повторно-кратковременный режим*** – это режим работы электродвигателя, при котором его температура не достигает установившегося значения ни во время работы, ни во время паузы.

***Показывающий прибор*** – это измерительный прибор, представляющий результат измерения в виде отсчета.

***Полная автоматизация*** – это автоматизация всех операций технологического процесса, включая операции анализа и коррекции процесса.

***Порог срабатывания реле*** – это значение входного сигнала, при котором оно приходит из исходного состояния во второе.

***Порог отпускания реле*** – это значение входного сигнала, при котором оно переходит из второго состояния в исходное.

***Последовательное соединение*** – это соединение элементов цепи, при котором по всем элементам, включенным в цепь, проходит один и тот же ток.

***Постоянный ток*** – электрический ток, величина и направление которого остаются постоянными.

***Программная автоматическая система*** – это система, в которой воздействие на объект формируется согласно наперед заданной программе.

***Продолжительный режим*** – это режим работы электродвигателя такой длительности, при котором его температура достигает во время работы установившегося значения.

***Прямая связь*** – это связь между элементами автоматики системы в направлении от регулятора к объекту.

***Регулирование по отклонению*** – это автоматическое воздействие на объект по величине отклонения регулируемой величины от заданного значения.

***Регулирование по возмущению*** – это автоматическое воздействие на объект в зависимости от величины непланируемого внешнего воздействия на него.

***Режим холостого хода источника*** – это режим, при котором ток в нем равен нулю.

***Режим короткого замыкания*** – это режим, при котором на внешних зажимах источника напряжение равно нулю.

***Реле*** – это элемент автоматики, выходной сигнал которого принимает два (три) фиксированных значения при плавном изменении входного сигнала.

***Система с разомкнутым контуром*** – это система автоматики, в которой входными воздействиями являются только внешние воздействия.

***Система с замкнутым контуром*** – это система автоматики, в которой входными воздействиями являются не только внешние воздействия, но и воздействия со стороны объекта.

***Система непрерывного регулирования*** – это такая система, у которой воздействие на объект есть непрерывная функция времени, пропорциональная воздействующей величине.

***Система прерывистого регулирования*** – это система воздействия на объект, у которой это воздействие представляется собой ряд последовательных импульсов, параметры которых зависят от воздействующей величины.

***Система релейного регулирования*** – это система воздействия на объект, у которой имеется только два значения фиксированных воздействий на объект.

***Синусоидальный ток*** – это ток, мгновенное значение которого изменяется по гармоническому закону синуса.

***Сопротивление*** – это параметр элемента электрической цепи, имеющего свойство поглощать из нее энергию и преобразовывать ее в другие виды энергии.

***Средства измерения*** – это технические средства, используемые при измерениях физических величин.

***Стабилизатор*** – это элемент автоматики, поддерживающий постоянное значение выходного сигнала, несмотря на изменение входного.

***Статическая характеристика*** элемента автоматики – это графическая зависимость между входным и выходным сигналами этого элемента.

***Схема электрической цепи*** – это графическое изображение соединений элементов цепи с помощью стандартных условных обозначений.

***Трехфазная цепь*** – это электрическая цепь, по которой проходят три синусоидальных тока, отличающихся по фазе.

***Управление в технических системах*** – это процесс воздействия на объект в соответствии с заданным алгоритмом управления.

***Управляемый объект*** – это часть общей системы, нуждающейся в воздействии автоматики.

***Управляемая величина*** – это параметр объекта, величина которого изменяется под влиянием регулятора.

***Усилитель*** – это элемент автоматики, увеличивающий мощность входного сигнала, не внося изменений в его физическую природу.

***Участок цепи*** – это часть электрической цепи, содержащая выделенные в ней элементы.

***Функциональная схема*** – это схема автоматической системы, составленная в виде функциональных блоков, с указанием направлений воздействий между ними.

***Цифровой измерительный прибор,*** в котором непрерывная измеряемая величина преобразуется в дискретную, подвергается цифровому кодированию, а результат измерения представляется в цифровой форме.

***Частичная автоматизация*** – это автоматизация только отдельных операций в технологическом процессе.

***Частота тока*** – это число периодов в одну секунду.

***Электрическая цепь*** – совокупность устройств, процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, напряжении и электродвижущей силе (*Э.Д.С.)*

***Электрический ток*** – это направленное движение носителей электрических зарядов.

***Электродвижущая сила (Э.Д.С.)*** – это основное свойство источника – электрической энергии, выражающееся в способности создавать и поддерживать разность потенциалов на разомкнутом участке цепи, а также возбуждать и поддерживать электрический ток в замкнутой цепи.

***Электропривод*** – электромеханическое устройство, состоящее из электродвигателя, передаточного, исполнительного и управляющего устройств.

***Элементы электрической цепи*** – это отдельные устройства, входящие в состав электрической цепи.

***Элемент автоматики*** – это составная часть системы автоматики, выполняющая определенные функции.

# ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране и за рубежом с каждым годом расширяются объемы работ по автоматизации инженерных систем зданий и сооружений. В каждом проекте строительства этих объектов наряду со строительно-технологическими решениями разрабатываются системы их автоматизации. Автоматизация сантехнических устройств и вентиляции, входящих в состав инженерных систем, является одним из важнейших источников экономии топливно-энергетических ресурсов, затрачиваемых на теплоснабжение систем зданий и сооружений. Автоматизация призвана также коренным образом преобразовать рабочие места, сделать труд работников жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) более производительным, творческим и привлекательным. Одним из существенных факторов интенсификации технологических процессов в агропромышленном комплексе Республики Беларусь является мелиорация земель, создающая благоприятные условия для улучшения плодородия почв и обеспечения высокорентабельного и конкурентоспособного сельскохозяйственного производства.

Одним из признаков технического совершенства мелиоративной системы является ее автоматизация в той или иной степени, позволяющая производить измерения, контроль и регулирование основных параметров мелиорируемого объекта с тем, чтобы способствовать получению высоких, устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

В настоящее время проектирование, строительство, модернизация и техническое совершенствование инженерных систем сочетается с обязательным требованием энерго- и ресурсосбережения. Автоматизация позволяет реализовать на практике это требование.

Эти важнейшие социальные и экономические задачи отражаются в постановлениях директивных органов нашей страны по строительству и ЖКХ, развитию аграрного бизнеса. Особое внимание в этих документах обращается на необходимость повышения эффективности эксплуатации зданий и сооружений, мелиоративных систем за счет внедрения нового оборудования и средств автоматического контроля и управления.

*Автоматизация* инженерных систем и протекающих в них технологических процессов – это совокупность технических средств и методов, освобождающих человека в определенной степени или полностью

от функций контроля и управления. Иначе говоря, автоматизация обеспечивает замену физического и умственного труда человека, затрачиваемого на контроль и управление, работой технических средств (от простейших измерительных приборов и регуляторов до современных управляющих микропроцессоров), обеспечивающих это управление без вмешательства человека, в функции которого входят только наблюдение за техническими средствами и подготовка их к работе.

Таким образом, автоматизация является высшей формой организации работы инженерных систем. При этом совокупность технических средств автоматики совместно с помещением (объектом управления) и оборудованием, поддерживающим заданный режим, образуют *систему управления.*

Любая форма автоматизации инженерных систем (частичная, комплексная, полная) всегда начинается с *автоматического контроля* за различными параметрами технологических процессов, осуществляемого с помощью измерительных приборов. Контролируемые параметры в инженерных системах различны: давление, температура, уровень расхода воздуха, жидкости, энергии или другой среды. Внедрение автоматического контроля позволяет перейти к автоматическому управлению, которое организуется чаще всего в виде двух ступеней. На верхней ступени цель управления – отыскание оптимального режима работы инженерной системы, на нижней – обеспечение минимальных отклонений теплотехнических параметров от их оптимальных значений, т. е. стабилизация параметров. При решении задач стабилизации вместо автоматического управления чаще применяют термин *автоматическое регулирование.*

Автоматическое управление инженерными системами сопровождается технологической сигнализацией и автоматической защитой. *Технологическая сигнализация* бывает командная, контрольная, предупредительная и аварийная. Командная сигнализация служит для передачи типовых управляющих сигналов от одного элемента управления к другому или объекту управления. Контрольная сигнализация извещает обслуживающий персонал о включении в работу или остановке отдельных механизмов оборудования, о положении запорных органов на различных коммуникациях. Предупредительная сигнализация служит для извещения персонала о возникновении опасных изменений эксплуатационного режима, грозящих аварией при их дальнейшем развитии. Аварийная сигнализация информирует персонал о происшедшем аварийном отключении оборудования.

*Автоматическая защита* предохраняет от аварий механизмы при недопустимых отклонениях параметров технологического процесса или с помощью автоматической блокировки предохраняет механизмы от неправильных действий дежурного персонала (вследствие невнимательности или ошибочных действий при аварии). Различают блокировки запретно-разрешающие и аварийные. Первые устраняют возможность неправильных или несвоевременных включений и отключений механизмов, а также несоблюдение установленной технологическим регламентом очередности пуска и остановки различных механизмов. Вторые блокировки предназначены для последовательного отключения оборудования, расположенного до элемента инженерной системы, подвергшегося аварийному отключению.

Наряду с автоматическим управлением в зданиях и сооружениях используются и другие виды управления, к которым прежде всего относятся дистанционное и телеуправление. *Дистанционное управление* – это ручное управление на расстоянии регулирующими и запорными органами или отдельными механизмами, осуществляемое с помощью пневматических или электрических приводов. В инженерных системах наибольшее распространение получили электроприводы, двигатели или электромагниты, которые обычно монтируются на регулирующем органе, а устройства управления ими располагают на некотором расстоянии от него, чаще всего в диспетчерском пункте. Дистанционное управление применяется либо самостоятельно, либо параллельно с автоматическим управлением. *Телеуправление* – это более сложная форма дистанционного управления. Оно осуществляется с помощью телемеханических устройств, позволяющих передавать большое число различных сигналов одновременно по одной линии связи или по небольшому их числу. Оба вида управления позволяют реализовать диспетчеризацию, что необходимо для четкой координации и взаимной увязки режимов работы отдельных инженерных систем в соответствии с изменением нагрузок во времени.

# 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ И ПРИБОРАХ

## 1.1. Основные понятия и определения техники измерений

Первой функцией управления, подвергшейся автоматизации, было измерение. Измерительный прибор с индикатором заменяет органы чувств человека, обеспечивает быстрые и достаточно точные измерения. При необходимости к нему можно подключить регистрирующий прибор (РП), записывающий динамику изменения технологических параметров (рис. 1.1). Эти данные могут использоваться для анализа протекания технологического процесса (ТП), а диаграмма, записанная регистратором, служит отчетным документом. Функции оператора (О) при автоматической индикации сводятся к определению ошибки управления, а также реализации регулирующего воздействия.

Небольшие технические усовершенствования позволили перейти от автоматической индикации к автоматическому контролю. В этом случае оператор получает информацию об отклонении технологических параметров от заданных значений. Система автоматического контроля, кроме измерителя и индикатора, содержит устройство сравнения (УС) и задатчик (ЗД) – устройство, которое помнит значение технологического параметра. Разделение функций между оператором и системой контроля показано на рис. 1.2. Таким образом, задачей *контроля* (от французского *controle* – проверка чего-либо) является обнаружение событий, определяющих ход того или иного процесса. В случае, когда эти события обнаруживаются без непосредственного участия человека, такой контроль называют автоматическим.

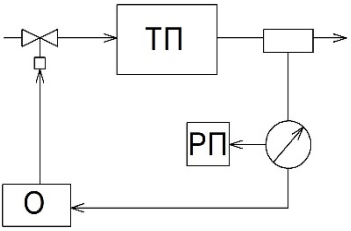



Рис. 1.1. Схема системы автоматической индикации

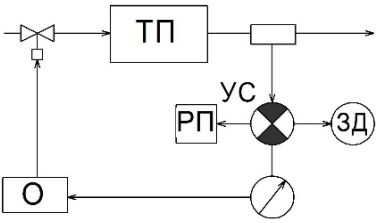



Рис. 1.2. Схема системы автоматического контроля

Важнейшей составной частью контроля является измерение физических величин, характеризующих протекание процесса. Такие величины называются *параметрами процесса.* Технологические процессы в инженерных системах характеризуются значениями таких физических величин (параметров), как влажность, давление, температура, уровень, расход и количество жидких и газовых сред.

*Измерением* называют нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Конечной целью любого измерения является получение количественной информации об измеряемой величине. В процессе измерения устанавливается, во сколько раз измеряемая физическая величина больше или меньше однородной с нею в качественном отношении физической величины, принятой за единицу.

Если $Q$ – измеряемая физическая величина, $[Q]$ – некоторый размер физической величины, принятой за единицу измерения, q – числовое значение $Q$ в принятой единице измерения, то результат измерения $Q$ может быть представлен следующим равенством:

$$Q = q[Q]. \tag{1.1}$$

Уравнение (1.1) называют основным уравнением измерения. Из него следует, что значение q зависит от размера выбранной единицы измерения $[Q]$. Чем меньше выбранная единица, тем больше для данной измеряемой величины будет числовое значение. Например, длина 1 м равна 10 дм, 100 см и т. д.

Результат всякого измерения является именованным числом. Поэтому для определенности написания результата измерения рядом с числовым значением измеряемой величины ставится сокращенное обозначение принятой единицы измерения. В нашей стране действует Международная система единиц измерения. В настоящее время эта система принята в большинстве стран мира и признана всеми международными организациями. Сведения о значениях измеряемых величин называют измерительной информацией.

*Сигналом измерительной информации* называется сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной (например, сигнал от термометра сопротивления). *Средством измерения* называют устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства. Сигнал измерительной информации, поступающий на вход средства измерений, называют *входным сигналом,* получаемый на выходе – *выходным сигналом* средства измерений.

## 1.2. Измерительные преобразователи и приборы

*Измерительный преобразователь* – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем (в практике применяется термин «датчик»). Измерительные преобразователи являются составными частями приборов и измерительных систем. По месту, занимаемому в приборе, они бывают первичные, промежуточные и передающие.

Преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т. е. первый элемент в измерительной цепи, называется *первичным измерительным преобразователем* (рис. 1.3). Например, электрод сигнализатора уровня, сужающее устройство (диафрагма) для измерения расхода и т. п.

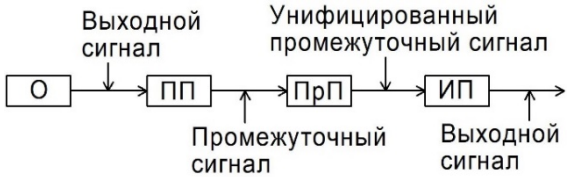



Рис. 1.3. Блок-схема измерительной цепи: О – объект измерения; ПП – первичный преобразователь (датчик); ПрП – промежуточный преобразователь; ИП – измерительный прибор

В системах автоматического контроля применяются устройства для выдачи сигнала о выходе значения параметра за установленные пределы, причем сигнал появляется при наличии самого факта выхода независимо от его размера. Такие устройства называют *датчиками-реле* или *сигнализаторами.*

*Промежуточным измерительным преобразователем* (или сокращенно промежуточным преобразователем) называется элемент измерительного устройства, занимающий в измерительной цепи место после первичного преобразователя. Основное назначение промежуточного преобразователя – преобразование выходного сигнала первичного преобразователя в форму, удобную для последующего преобразования в сигнал измерительной информации для дистанционной передачи. Примером промежуточного измерительного преобразователя может служить мембранный блок дифманометра – расходомера. В измерительной цепи измерения расхода он занимает место непосредственно

после сужающего устройства и преобразует перепад давления на сужающем устройстве в соответствующее перемещение мембраны мембранного блока и связанной с нею механической системой прибора.

*Передающим измерительным преобразователем* (или сокращенно передающим преобразователем) называется элемент измерительного устройства, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации. Примером передающего преобразователя могут служить разные электрические или пневматические преобразователи, встраиваемые в дифманометры – расходомеры. С их помощью, например, перемещение мембраны, изменяющее положение сердечника дифференциального трансформатора дифманометра, преобразуется в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 0…5 мА (электрический преобразователь). В последнее время в связи с применением в измерительной технике различных ЭВМ и микропроцессоров получают распространение аналогоцифровые (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Первые служат для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, изменяющиеся дискретно во времени с постоянным шагом; вторые – для преобразования дискретных по времени сигналов в аналоговые. В теплотехнических измерениях чаще всего применяют АЦП. Чувствительный элемент – элемент измерительного преобразователя, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой или регулируемой величины. В промышленных условиях в качестве чувствительных элементов применяют плоские и гофрированные упругие мембраны, гармониковые мембраны (сильфоны), трубчатые пружины, поплавки, биметаллические пластины и другое.

Для удовлетворения возросших потребностей создана Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), представляющая собой организованную совокупность средств измерений, автоматизации и управляющей вычислительной техники, а также программных средств для построения автоматических систем измерения, контроля, регулирования, диагностики и управления производственными процессами, технологическими линями и агрегатами. Номенклатура технических средств ГСП позволяет создавать самые разнообразные, любой сложности системы автоматического регулирования и управления из стандартизованных средств измерения и автоматизации.

В зависимости от вида энергии питания, входных и выходных сигналов ГСП разделяют на электрическую, пневматическую и гидравлическую ветви. В инженерных системах применяют в основном средства первых двух ветвей ГСП, которыми предусмотрены общепро-

мышленные унифицированные электрические и пневматические сигналы передачи информации.

Средство измерения с помощью которого измерительная информация выдается в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, называется *измерительным прибором.* В практике автоматизации для приборов, устанавливаемых на щитах, применяется термин *вторичный прибор,* т. е. устройство, воспринимающее сигнал от первичного или передающего измерительного преобразователя и выражающее его в воспринимаемом виде с помощью отсчетного устройства (шкалы, диаграммы, интегратора, сигнального устройства).

К первичным преобразователям также относят и отборные устройства. *Отборным устройством* (отбором) называют устройство, устанавливаемое на трубопроводах и технологических агрегатах и служащее для непрерывного или периодического отбора контролируемой среды и передачи значений ее параметров к измерительному преобразователю или измерительному прибору. В отличие от первичного измерительного преобразователя отборное устройство передает к измерительному прибору или преобразователю измеряемую величину, не изменяя ее физической природы (например, отбор давления среды в технологическом аппарате и передача его по импульсной трубке для измерения к манометру). *Импульсной трубкой* называют трубопровод небольшого диаметра, связывающий объект с преобразователем или измерительным прибором.

Совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для обработки, передачи и (или) использования в системах автоматического управления, называется *измерительной системой.*

К вспомогательным устройствам измерительной системы относятся устройства, предназначенные для питания энергией средств измерения, защиты от внешних воздействий, внутренних перегрузок и т. д.

Под определением системы автоматизации следует понимать совокупность приборов и средств автоматизации (измерительной, преобразующей, передающей и исполнительной, а также управляющей вычислительной техники), связанных между собой каналами связи в единые системы, например измерительные системы, системы автоматического регулирования, системы сигнализации, защиты и управления технологическими процессами.

В показывающих приборах измерительная информация воспроизводится положением стрелки или какого-либо другого указателя отно-

сительно отметок шкалы прибора. *Шкала* представляет собой совокупность отметок, расположенных вдоль какой-либо линии, и представленных около них чисел отсчета, соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины. Для каждого измерительного прибора устанавливается *диапазон показаний* – область значений шкалы, ограниченная начальным и конечным ее значениями.

### 1.2.1. Первичный преобразователь. Основные характеристики

Главным элементом измерительного прибора является первичный измерительный преобразователь или датчик. В системах автоматического контроля (САК) датчик называют первичным прибором. Он соединяется линией связи со вторичным прибором, объединяющим измерительное устройство и указатель. Вторичные приборы применяют для передачи, обработки, хранения информации. Один и тот же вторичный прибор может использоваться для контроля нескольких параметров. Датчики являются одним из основных функциональных элементов всякой системы контроля. Их свойства и характеристики часто во многом определяют работу САК в целом.

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

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

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

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

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

Такая классификация позволяет выбрать наиболее пригодные измерительные устройства.

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

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

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

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

$$S = \frac{Y}{X} = \frac{\Delta Y}{\Delta S}. \tag{1.2}$$

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

Чувствительность датчика зависит от вида его статической характеристики, которой является аналитически или графически выраженная зависимость выходной величины от входной. Желательно, чтобы характеристика была линейной, непрерывной и не имела гистерезиса (с однозначным выходным сигналом). У датчиков с линейной характеристикой чувствительность постоянна во всем диапазоне измерений, что дает возможность делать шкалу прибора равномерной. Большое значение имеет динамическая характеристика датчика – зависимость выходного от входного сигнала во времени, особенно при изменениях в нестационарных условиях. Важнейшей динамической характеристикой является инерционность датчика. Об инерционности датчика судят по динамической постоянной $T_Z$ и времени запаздывания τ.

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

При выборе датчиков необходимо учитывать, что во время эксплуатации они находятся в особо тяжелых условиях. Размещают их непо-

средственно на объекте контроля, при резко изменяющихся температурах, давлениях, вибрациях, агрессивном действии контролируемых сред. В связи с этим требуется тщательный выбор принципов построения, конструктивных элементов и материалов с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности. Важнейшими эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к датчикам, являются необходимость несложной, надежной, недорогой и удобной конструкции; взаимозаменяемости; надежного контакта с объектом или средой и отсутствия обратного влияния датчика на объект.

Нормальными условиями эксплуатации принято считать:

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

### 1.2.2. Вторичные приборы систем автоматического контроля

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

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

По устройству и назначению вторичные приборы делятся на две группы:

1) показывающие, дающие информацию о мгновенном значении измеряемого параметра;

2) показывающие и самопишущие, осуществляющие мгновенное

измерение и фиксирующие величину измеряемого параметра на диаграммной бумаге.

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

Приборы каждой группы выпускаются в четырех модификациях, имеющих соответствующие измерительные схемы. Приборы КВ-1, КС-2 и КС-4 могут выпускаться многоточечными, при этом они контролируют 3, 6, 12 однотипных датчиков, а на диаграмме отметки о величине измеряемого параметра печатаются циклично точками, рядом с которыми цифрами указываются номера датчиков. В настоящее время разработан комплекс узкопрофильных вторичных показывающих приборов АСК. Они занимают на щитах в 5…10 раз меньшую площадь, чем приборы комплекса КС, и имеют световые указатели – светофильтры, позволяющие выделить зону допустимого изменения технологического показателя.

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

В зависимости от сигнала первичного прибора выбирается тип измерительной схемы, а в зависимости от информационной функции прибора и требуемой точности контроля принимается конструктивное

решение вторичного прибора. Шкала прибора определяется по каталогу таким образом, чтобы верхний предел измерений приблизительно соответствовал двум третям шкалы, после чего устанавливается набор необходимых дополнительных устройств

## 1.3. Погрешности измерений

Любые теплотехнические измерения относительны, поскольку всегда существует положительная и отрицательная разность между наблюдаемым или численным значением измеряемой величины и ее истинным значением, называемая погрешностью. Таким образом, *погрешность* – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Различают абсолютную и относительную погрешности измерения. Абсолютная погрешность средств измерений (прибора) $\Delta X$ равна разности между результатом измерения $X_И$ и истинным значением измеряемой величины $X$:

$$\Delta X = X_и - X. \tag{1.3}$$

На практике вместо понятия «истинное значение» пользуются обычно понятием действительное значение измеряемой величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что оно может быть использовано вместо истинного. Относительная погрешность $\delta_о$ представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta_0 = \frac{\Delta X}{X} 100\ \%. \tag{1.4}$$

В измерительной технике используется также понятие приведенной погрешности. Приведенной погрешностью $\delta_{пр}$ называют отношение абсолютной погрешности прибора к нормирующему значению $X_Н$. Нормирующее значение условно может быть принятым равным верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы:

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta X}{X_н}\ 100\ \%. \tag{1.5}$$

Погрешности любого средства измерения подразделяют на основную и дополнительные. Основная – погрешность, проявляющаяся в

нормальных условиях измерения. Дополнительные погрешности возникают вследствие изменения за допустимые значения нормальных условий, например температуры или влажности окружающей среды, атмосферного давления, напряжения питания и т. п. Требования к точности средств измерений обусловлены задачами, для решения которых осуществляются измерения. Для оценки точности работы средств измерений, предназначенных для различных целей, установлены так называемые классы точности измерительной аппаратуры.

Погрешности измерения в зависимости от их происхождения делятся на три группы: систематические, случайные и субъективные (промахи).

*Систематические погрешности* имеют постоянный характер и по причинам возникновения делятся: на инструментальные; погрешности от неправильной установки средств измерений; погрешности, возникающие вследствие внешних влияний; методические (теоретические) погрешности.

*Инструментальные погрешности* могут вызываться конструктивными и технологическими погрешностями, а также износом и старением средств измерений.

*Конструктивные погрешности* вызываются несовершенством конструкции или неправильной технологией изготовления средств измерений. Плохая балансировка измерительного механизма, неточности при нанесении отметок шкалы, некачественная сборка прибора вызывают технологическую погрешность. Конструктивная погрешность у приборов одного типа постоянна, технологическая же погрешность меняется от экземпляра к экземпляру. Длительная или неправильная эксплуатация прибора, а также длительное хранение приводят к погрешностям, которые называют *погрешностями износа и старения.*

*Погрешности от неправильной установки* могут вызываться наклоном прибора, т. е. отклонением от нормального рабочего положения; установкой на ферромагнитный щит прибора, градуированного без щита; близким расположением приборов друг к другу.

*Погрешности, возникающие вследствие внешних влияний,* вызываются вибрацией, электромагнитными полями, конвекцией воздуха и др.

Наиболее сильное воздействие на показания приборов оказывает изменение температуры окружающей среды. Даже незначительные перепады температуры между отдельными элементами прибора приводят к заметным погрешностям вследствие, например, возникновения паразитных термических *Э.Д.С.* Поэтому не рекомендуется устанавливать приборы вблизи источников тепла.

*Методические погрешности* возникают в результате несовершенства метода измерений и теоретических допущений (использование приближенной зависимости). К таким погрешностям относятся, например, погрешности, обусловленные пренебрежением внутренним сопротивлением прибора, т. е. пренебрежением собственным потреблением электроэнергии.

Для исключения погрешности до начала измерений следует определить причину, вызывающую погрешность, и устранить ее.

Например, если погрешность вызывается влиянием внешнего электромагнитного поля, то нужно либо экранировать прибор, либо удалить источник помехи. Для исключения температурной погрешности средство измерения термостатируют, вибрацию устраняют путем установки амортизаторов. В процессе измерения погрешность устраняется применением специальных методов измерения.

*Случайные погрешности* вызываются независящими друг от друга случайными факторами и изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Проявляются случайные погрешности в том, что при измерениях одной и той же неизменной величины одним и тем же средством измерения и с той же тщательностью получают различные показания. Следует отметить, что если при повторных измерениях одной и той же величины и тем же средством измерения получают совершенно одинаковые результаты, то это обычно указывает не на отсутствие случайной составляющей погрешности, а на недостаточную чувствительность средства измерения. Полностью совпадающие, как и сильно разнящиеся, результаты наблюдений при измерениях одинаково свидетельствуют об их неточности. Случайные погрешности могут возникнуть, например, из-за трения в опорах, люфтов в сочленениях кинематической схемы измерительного прибора, неправильного режима работы электронных устройств и по многим другим, труднообъяснимым причинам.

*Субъективные погрешности (промахи)* – это погрешности, вызванные ошибками лица, производящего измерение (например, неправильный отсчет по шкале прибора, неверное подключение проводов к датчику и др.).

Погрешности измерений устанавливаются при *поверке* – определении метрологическим органом погрешностей средств измерений и установления пригодности их к применению (применять сочетание слов *поверка показаний* не рекомендуется, следует говорить *поверка средств измерений).* Слово *проверка* применяется для установления комплектности или оценки состояния взаимодействия элементов. За-

висимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы, называется *градуировочной характеристикой,* определение которой называется градуировкой средств измерения (термин *тарировка* устарел и применять его не рекомендуется).

## 1.4. Класс точности средств измерений

В зависимости от основной погрешности средствам измерений присваиваются соответствующие классы точности. *Класс точности* – это обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средства измерения.

Класс точности – обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерения, влияющих на точность. Для выпускаемых промышленных приборов класс точности устанавливают численно равным допускаемой основной приведенной погрешности, выраженной в процентах. По значению допускаемой основной погрешности промышленные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Например, прибор класса точности 1,5 имеет максимально допускаемую основную приведенную погрешность ±1,5 %.

Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих средств (под точностью средств измерений понимается качество измерений, отражающее близость нулю их погрешностей). На циферблаты, шкалы, щитки, корпуса средств измерений всегда наносят условные обозначения класса точности, включающие числа и прописные буквы латинского алфавита. Пределом допускаемой погрешности средства измерения называется наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерения, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению. Предел допускаемой основной погрешности может выражаться одним из трех способов в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей.

Для средств измерений, у которых нормируются абсолютные погрешности, класс точности обозначается прописными буквами латин-

ского алфавита или римскими цифрами. В определенных случаях добавляется индекс в виде арабской цифры. Такое обозначение класса точности не связано с пределом допускаемой погрешности, т. е. носит условный характер.

Для средств измерений, у которых нормируется приведенная или относительная погрешность, класс точности обозначается числами и существует связь между его обозначением и значением предела допускаемой погрешности.

В первом случае число, обозначающее класс точности и предел допустимой основной погрешности, выраженной в процентах, совпадают. Это число заключается в кружок. Во втором случае в обозначение точности входят два числа, которые разделяются косой чертой. Например, 0,02 / 0,01, без кружка.

# 2. ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

## 2.1. Общие сведения о датчиках

При автоматизации технологических процессов возникает необходимость контролировать различные электрические и неэлектрические величины с помощью специальных устройств.

Воспринимающие элементы и преобразователи электрических величин рассматриваются в курсе «Электрические измерения».

Автоматическое управление неэлектрическими параметрами технологического процесса происходит путем предварительного преобразования их чаще всего в электрические величины. Измерение неэлектрической величины и преобразование ее в электрическую производится с помощью датчиков.

Большинство электрических датчиков в определенной степени обладает универсальностью, т. е. могут быть использованы при автоматизации различных по характеру технологических процессов. Однако при конкретном выборе средств автоматики следует применять такие датчики, которые более всего подходят для данного объекта автоматизации.

К датчикам систем автоматики предъявляются следующие требования: определенная однозначная зависимость выходной величины от входной; стабильность характеристик во времени; высокая чувствительность; малая инерционность; отсутствие влияния датчика на технологический процесс и на измеряемую величину; удобство монтажа и

обслуживания; соответствие требуемому диапазону изменения измеряемой величины; соответствие существующей измерительной аппаратуре и источникам питания; надежность работы и устойчивость датчика к внешним воздействиям.

## 2.2. Реостатные датчики

Для контроля линейных и угловых перемещений, измерения усилий, моментов и ускорений применяются контактные, потенциометрические, угольные и тензометрические датчики.

Контактные датчики являются наиболее простыми датчиками рассматриваемого типа. Они преобразуют механическое перемещение или усилие в электрический импульс переменного или постоянного тока, замыкая или размыкая свои контакты. Последовательно с контактами включаются сигнальные лампы, реле, полупроводниковые или вакуумные усилители, измерительные приборы и другие устройства.

С помощью контактных датчиков осуществляются измерение и контроль величин усилий, промежуточных и предельных перемещений, конфигураций и размеров изделий или отдельных узлов установки. Точность работы контактного датчика зависит от мощности, разрываемой его контактами. Чем меньше эта мощность, тем точнее работа датчика. Контактные датчики выпускаются в различных исполнениях: однопредельные (рис. 2,1, *а*) и многопредельные (рис. 2.1, *б*). Последние используются для измерения величин, изменяющихся в значительных пределах. Основные недостатки контактных датчиков – сложность осуществления непрерывного контроля и ограниченный срок службы контактной системы.

Потенциометрические датчики применяются главным образом для контроля линейных и угловых перемещений. Реостат активного сопротивления этих датчиков включается по схеме потенциометра, благодаря этому они и получили свое название.

Датчик состоит из постоянного проволочного или пленочного сопротивления и подвижного контакта, при перемещении которого изменяется напряжение на вторичном приборе *П*, проградуированном в единицах контролируемого параметра.

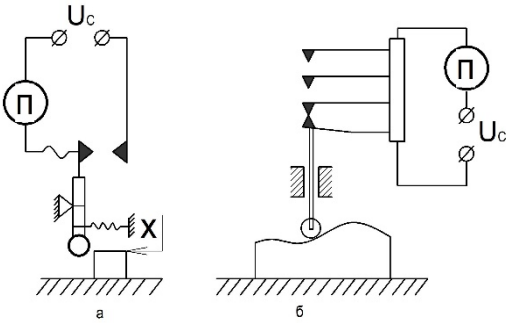



Рис. 2.1. Контактные датчики: *а* – однопредельный; *б* – многопредельный

Подвижный контакт потенциометра связан с контролируемым перемещением (рис. 2.2, *а*). Чтобы исключить влияние отклонений напряжения, рекомендуется осуществлять питание датчика от стабилизатора.

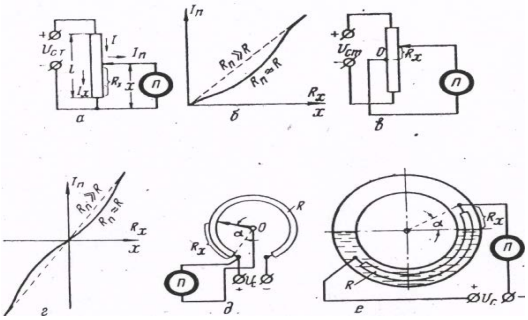



Рис. 2.2. Потенциометрические датчики: *а* – с прямым каркасом; *б* – характеристика датчика с прямым каркасом; *в* – со средней точкой; *г* – характеристика датчика со средней точкой; *д* – с кольцевым каркасом; *е* – бесступенчатый датчик угла поворота

Характеристику потенциометрического датчика $I_п = f(R_x)$ стремятся сделать прямолинейной (рис. 2.2, *б* и *г*). Это достигается при помощи соответствующего режима работы потенциометра, способа намотки проволочного реостата, а также выбора сопротивления вторичного прибора. Если необходимо, чтобы выходной ток и напряжение соответствовали по знаку направлению перемещения движка, то применяют потенциометр со средней точкой (рис. 2.2, *в*), характеристика которого дана на рис. 2.2, *г*. Для контроля угловых перемещений служат

датчики, каркасы которых выполняются в виде дуги окружности (рис. 2.2, *д*). Для получения бесконтактного датчика угловых перемещений с плавным выходом используются жидкостные потенциометрические датчики (рис. 2.2, *е*). Потенциометрические датчики отличаются простотой конструкции и не нуждаются в усилителях, так как снимаемая с них мощность достаточна для приведения в действие вторичных приборов.

Характеристика и чувствительность потенциометрического датчика рассчитываются аналитически. Так, для схемы, изображенной на рис. 2.2, *а*, можно составить следующие уравнения:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{x}{l}; \frac{I_x}{I_п} = \frac{R_п}{R_x}; \tag{2.1}$$

$$I = I_x + I_п; U_{ст} = I(R - R_x) + I_п R_п, \tag{2.2}$$

где $U_{ст}$ – стабилизированное напряжение питания датчика;

$R$ – полное сопротивление потенциометра;

$R_x$ – сопротивление части потенциометра;

$R_п$ – сопротивление вторичного прибора;

$I_п$ и $I_x$ – токи в сопротивлениях $R_п$ и $R_x$.

Решая уравнения относительно $I_п$, получим:

$$\frac{l_x}{I_п} I = \frac{R_п}{R_x};$$

$$I_n = \frac{U_{ст}}{R_п} \cdot \frac{R_x}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_п} + \frac{R_x^2}{RR_п}}. \tag{2.3}$$

Если $R_п \geq (8 \div 10)R$, т. е. выходная величина $I_п$ прямо пропорциональна входной x:

$$I_п \approx \frac{U_{ст}}{R_п} \cdot \frac{R_x}{R} = \frac{U_{ст}}{R_п} \cdot \frac{x}{l}. \tag{2.4}$$

Чувствительность датчика (в А/м и В/м):

$$k_{\text{д}} = \frac{dI_{\text{п}}}{dx} = \frac{U_{\text{ст}}}{R_{\text{п}} I}, \tag{2.5}$$

$$k_{\text{д}} = \frac{dU_{\text{п}}}{dx} = \frac{U_{\text{ст}}}{I}. \tag{2.6}$$

Для датчика с кольцевым каркасом характеристики и чувствительность определяются из следующих соображений. Напряжение на вторичном приборе:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{ст}} \frac{R_x}{R}, \tag{2.7}$$

а ток

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{п}}}. \tag{2.8}$$

Если сопротивление потенциометра равномерно распределено по длине окружности, то зависимость тока в приборе от угла поворота α определяется уравнением:

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ст}}}{R R_{\text{п}}} r \rho \alpha, \tag{2.9}$$

где $r$ – радиус каркаса;

ρ – сопротивление обмотки, отнесенное к единице длины окружности, Ом/м.

Чувствительность датчика (в А/рад):

$$k_{\text{д}} = \frac{dI_{\text{п}}}{d\alpha} = \frac{U_{\text{ст}}}{R R_{\text{п}}} r \rho. \tag{2.10}$$

## 2.3. Индуктивные и трансформаторные датчики

Принцип действия индуктивных и трансформаторных датчиков основан на явлении изменения индуктивности или взаимоиндуктивности катушки со стальным сердечником при перемещении подвижной части магнитной системы (стального ярма). Они получили очень широкое распространение благодаря простоте и надежности конструкции, большой мощности на выходе и отсутствию подвижных контактов. Индуктивные и трансформаторные датчики работают от сети пере-

менного тока на частотах от 50 Гц до нескольких килогерц и могут замерять линейные и угловые перемещения в диапазоне от десятых долей микрона до нескольких десятков миллиметров.

Схема простейшего индуктивного датчика с плоским подвижным якорем приведена на рис. 2.3, *а*, а его характеристика – на рис. 2.3, *б*. Входной величиной датчика является изменение воздушного зазора δ, выходной – ток $I_п$ во вторичном приборе П. Величина тока $I_п$ зависит от индуктивного сопротивления обмотки и активных: сопротивлений обмотки и прибора. Индуктивное сопротивление прибора меньше, чем датчика, и им можно пренебречь. Индуктивность катушки с учетом двух воздушных зазоров (в Гн) определяется по приближенной формул:

$$L = \frac{2\pi\omega^2 S\, 10^{-5}}{\delta}, \qquad (2.11)$$

ток на выходе:

$$L_п = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}, \qquad (2.12)$$

где $R = R_{об} + R_п$ – суммарное активное сопротивление обмотки и вторичного прибора, Ом;

$\omega L$ – индуктивное сопротивление обмотки, Ом;

ω – число витков катушки;

$S$ – поперечное сечение магнитопровода, м$^2$;

δ – воздушный зазор, м.

Чувствительность датчика (в А/м) без учета активного сопротивления $R$:

$$k_д = \frac{dI_п}{d\delta} = \frac{U\cdot 10^5}{2\pi w^2 \omega S}. \qquad (2.13)$$

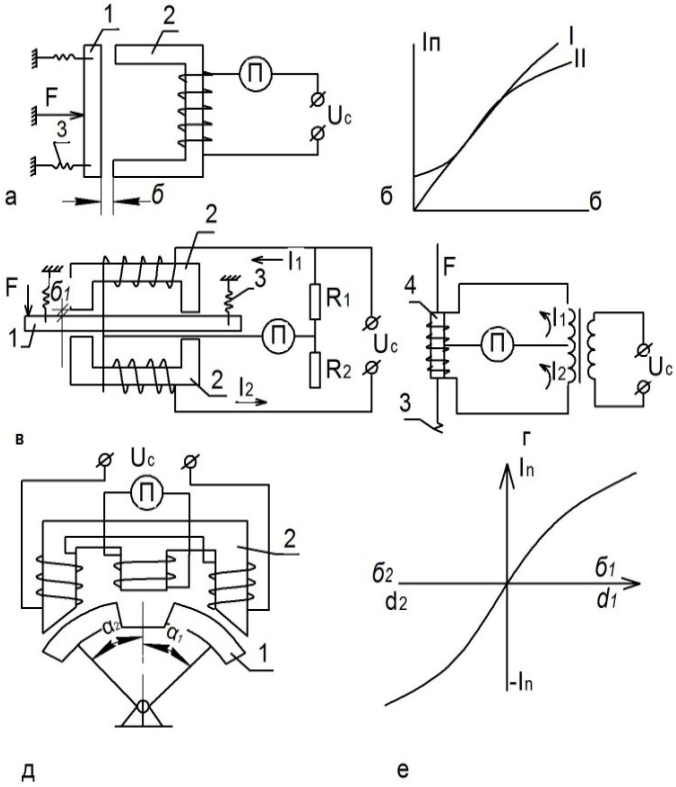



Рис. 2.3. Индуктивные датчики: *а* – простейший плоскостной; *б* – характеристика плоскостного датчика; *в* – дифференциальный плоскостной; *г* – дифференциальный плунжерный; *д* – трансформаторный датчик угла повотора; *е* – характеристики плунжерных и трансформаторных датчиков; *1* – подвижный якорь; *2* – неподвижный магнитопровод; *3* – пружина; *4* – подвижной плунжер

Наиболее широкое распространение получили дифференциальные датчики. В дифференциальном датчике входной величиной является смещение плунжера (якоря) относительно среднего положения, а выходной – геометрическая разность токов $I_1 - I_2$ (рис. 2.3, *в* и *г*).

При нейтральном положении плунжера $I_1 = I_2$ и, следовательно, ток во вторичном приборе отсутствует. При смещении плунжера изменяются индуктивные сопротивления обмоток датчика, поэтому нарушается равенство токов $I_1$ и $I_2$ и появляется выходной сигнал.

Фаза выходного сигнала зависит от направления отклонения плунжера.

На рис. 2.3, *д* показана схема трансформаторного датчика угла поворота. При $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ э.д.с. в обмотке среднего сердечника не наводится, поскольку магнитные потоки, создаваемые намотанными в противоположном направлении обмотками крайних сердечников, равны и направлены встречно.

При смещении якоря магнитное сопротивление для потока одной обмотки увеличивается, а для потока второй – уменьшается, вследствие чего на выходе датчика появляются напряжение и ток.

## 2.4. Емкостные и пьезоэлектрические датчики

Емкостные датчики преобразуют разнообразные входные воздействия (механические усилия, линейные или угловые перемещения и др.) в изменение емкости конденсатора.

Конструктивно емкостной датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, у которого при воздействии входных величин изменяется или расстояние между обкладками δ, или площадь обкладок *S*, или диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_0\varepsilon$ межобкладочного пространства.

На рис. 2.4 схематически показано несколько типов емкостных датчиков.

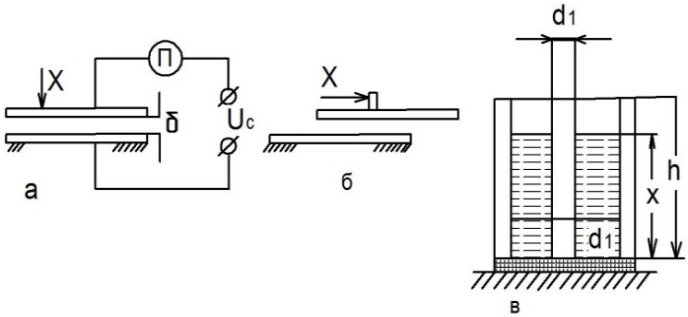



Рис. 2.4. Емкостные датчики: *а* – с изменением зазора δ; *б* – с изменением площади обкладок; *в* – с изменением диэлектрической проницаемости межобкладочного пространства

Величина емкости плоскостного датчика (в ф, рис. 2.4, *а* и *б*):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta}, \qquad (2.14)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха);

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами.

Относительное изменение емкости:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta\delta}{\delta}. \qquad (2.15)$$

Зная изменения какого-либо параметра датчика, например δ ($\Delta S = 0$; $\Delta\varepsilon = 0$), возникшее при воздействии входной величины *x*, легко определить чувствительность плоскостного датчика:

$$k_{\text{д}} = \frac{dC}{d\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta^2}. \qquad (2.16)$$

Для цилиндрического датчика (рис. 2.4, *в*) величина емкости (в ф):

$$C = 2\pi\varepsilon_0 \frac{(\varepsilon - 1)x + h}{In\frac{d_2}{d_1}}, \qquad (2.17)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, заполнившей нижнюю часть датчика.

Чувствительность цилиндрического датчика (в ф/м):

$$k_{\text{д}} = \frac{dC}{dx} = 2\pi\varepsilon_0 \frac{\varepsilon - 1}{In\frac{d_2}{d_1}}. \qquad (2.18)$$

Для увеличения чувствительности емкостных датчиков используются дифференциальные и резонансные схемы включения.

Емкостные датчики практически безинерционны и поэтому применяются для измерения быстро меняющихся величин (давлений, вибраций, ускорений и т. п.).

Мощность выходного сигнала емкостных датчиков мала, поэтому к ним присоединяют усилители. Для уменьшения числа каскадов усиления и снижения емкостного сопротивления емкостные датчики питаются от источников повышенной частоты.

Для замера параметров быстро протекающих динамических процессов используются также пьезоэлектрические датчики.

Пьезоэлектрический датчик представляет собой набор пластинок из материала, обладающего так называемым пьезоэффектом (например, из кварца). В момент приложения к пластинке механических усилий на ее поверхности появляются электрические заряды (рис. 2.5).

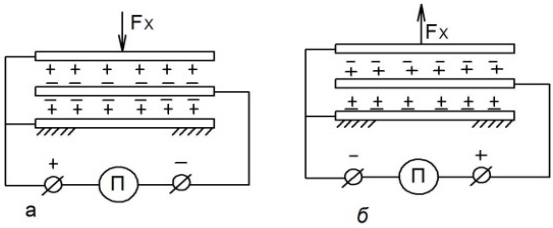



Рис. 2.5. Принципиальная схема пьезоэлектрического датчика при действии сил сжатия (*а*) и растяжения (*б*)

Суммарная величина заряда пропорциональна давлению. Электрические заряды создают электрическое поле, напряженность которого замеряется специальными чувствительными электронными устройствами. Таким образом, на обкладках датчика появляется напряжение, пропорциональное давлению:

$$U = \frac{a_0 F_x}{C}, \tag{2.19}$$

где $C$ – суммарная емкость датчика и соединительных проводов;

$a_0$ – коэффициент пропорциональности, называемый пьезомодулем;

$F_x$ – механическое усилие сжатия или растяжения.

Чувствительность датчика (в В/Н):

$$k_д = \frac{dU}{dF_x} = \frac{a_0}{C}. \tag{2.20}$$

Направление механического усилия (сжатие или растяжение) определяется по знаку заряда или напряжения.

Оптические (световые) датчики применяются как элемент автоматики, реагирующий на появление или исчезновение светового луча на изменение величины освещенности, светового потока или на количество световых импульсов.

В сельскохозяйственном производстве оптические датчики используются в устройствах автоматического отключения и включения уличного освещения в зависимости от смены дня и ночи, в регуляторах освещенности и интенсивности облучения в теплицах, в животноводстве и птицеводстве, в измерителях дымности воздуха и мутности воды, газоанализаторах, в устройствах контроля пламени в топках, работающих на жидком топливе, в различных защитных устройствах и т. п.

В качестве воспринимающих элементов в оптических датчиках используются фоторезисторы, электровакуумные фотоэлементы, фотодиоды и фототриоды.

У фоторезистора под действием света увеличивается количество свободных электронов, а следовательно, и электропроводность. Увеличение электропроводности полупроводника под действием световой энергии называется *внутренним фотоэффектом*. Фоторезистор (рис. 2.6, *а*) в большинстве случаев представляет собой нанесенный на стеклянную пластину *5* тонкий слой полупроводникового вещества *4*. К противоположным сторонам полупроводникового слоя прикрепляются металлические электроды *1*, предназначенные для включения фоторезистора в электрическую цепь. Пластинка с нанесенным на нее полупроводниковым слоем запрессовывается в пластмассовую оправу *2* с отверстием (рабочим окном) для прохода световых лучей. Рабочее окно покрывается светопроницаемым лаком *3*.

Область применения каждого типа фоторезистора зависит от его свойств и параметров. Свойства и параметры фоторезисторов выражаются световой, спектральной и вольтамперной характеристиками, интегральной и удельной чувствительностью, а также отношением темнового сопротивления к световым и другим величинам.

На рис. 2.6, *б* приведена световая характеристика фоторезистора. *Световой характеристикой* $I_ф = f(Ф)$ называют зависимость фототока от величины светового потока при неизменной величине приложенного напряжения.

*Интегральной чувствительностью* называют величину фототока, протекающего по короткозамкнутой цепи фоторезистора под действием единицы светового потока, неразложенного в спектр (в мкА/лм):

$$k_{\text{и}} = \frac{I_{\text{ф}}}{\Phi}, \tag{2.21}$$

где $I$ и Ф – соответственно ток и световой поток.

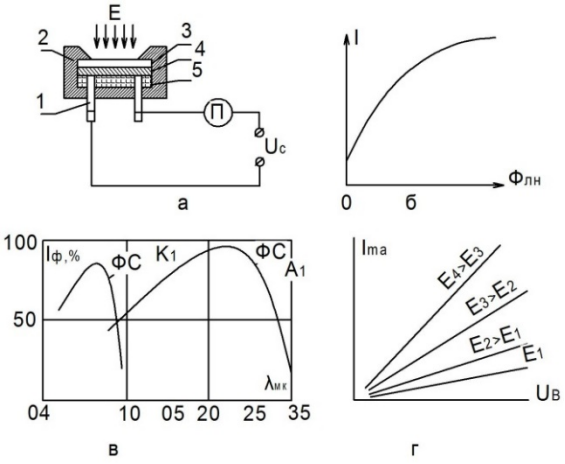



Рис. 2.6. Фоторезистор и его характеристики: *а* – схема включения; *б* – световая характеристика; *в* – спектральная характеристика; *г* – вольт-амперная характеристика

В паспортных данных фоторезисторов приводится удельная чувствительность, которая представляет собой отношение фототока к световому потоку при напряжении 1 В (в мкА/лм·В):

$$k_0 = \frac{I_{\text{ф}}}{\Phi U}, \tag{2.22}$$

где $U$ – напряжение, приложенное к фоторезистору.

Максимальная чувствительность определяется умножением удельной чувствительности на максимальную разность потенциалов.

Зависимость $k = f(\lambda)$ чувствительности фоторезистора от длины волны светового потока называется *спектральной характеристикой* (рис. 2.6, *в*).

Зависимость тока фоторезистора от напряжения при постоянной освещенности называют *вольтамперной характеристикой* (рис. 2.6, *г*).

Отношение темнового сопротивления к световому зависит от зна-

чения светового потока и характеризует кратность изменения сопротивления.

Световая характеристика большинства фоторезисторов может быть выражена аналитической зависимостью:

$$I_ф = k_0USE^{\alpha}, \qquad (2.23)$$

где $S$ – площадь освещенного фоточувствительного слоя, м$^2$;

$E$ – освещенность, лк;

α – постоянный коэффициент, по величине всегда меньший единицы;

$I_ф$ – фототок, мкА.

Фоторезисторы имеют высокую светочувствительность, простую конструкцию, малые габариты, значительную мощность рассеяния и практически неограниченный срок службы. Они могут работать в цепях постоянного и переменного токов. Эти качества обусловили широкую область применения фоторезисторов.

К недостаткам фоторезисторов следует отнести некоторую зависимость их параметров от температуры и нелинейную зависимость величины фототока от светового потока, а также значительную инерционность (постоянная времени у них порядка $3\cdot10^{-3}$ – $3\cdot10^{-5}$ *с* при световом потоке $10^{-5}$ лм).

В последнее время в автоматику начали широко внедряться фотодиоды и фототриоды. Принцип действия полупроводниковых фотодиодов и фототриодов основан на использовании свойств *p–n*-перехода в германиевом или кремниевом слое.

*Фотодиод* – это полупроводниковый приемник лучистой энергии, имеющий направленное движение носителей тока при воздействии энергии оптического излучения.

Режим работы фотодиода с внешним источником питания называется *фотодиодным*, а без внешнего – *вентильным*.

На рис. 2.7 приведены принципиальная схема включения фотодиода и его характеристики.

При напряжении, приложенном в запирающем направлении, поле на *n–p*-переходе возрастает и форсирует переход дырок из *n*-области в *p–n*-переход. Фотодиодный режим дает значительное повышение чувствительности, недоступное для обычных вентильных фотоэлементов. При малых значениях освещенности величина фототока находится в линейной зависимости от величины светового потока: $I_ф = k_и Ф$. Зави-

симость сопротивления фототриода от температуры используется для построения датчиков температуры.

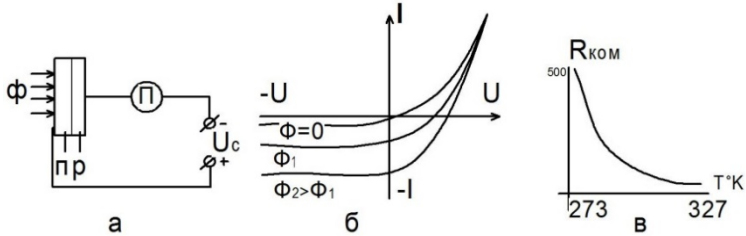



Рис. 2.7. Фотодиод и его характеристики: *а* – схема включения; *б* – вольт-амперная характеристика; *в* – температурная характеристика

*Фототриод* – это полупроводниковый приемник лучистой энергии, имеющий направленное движение носителей тока и обладающий свойством усиления фототока при действии энергии оптического излучения. На рис. 2.8 приведена принципиальная схема включения фототриода и его вольтамперная характеристика.

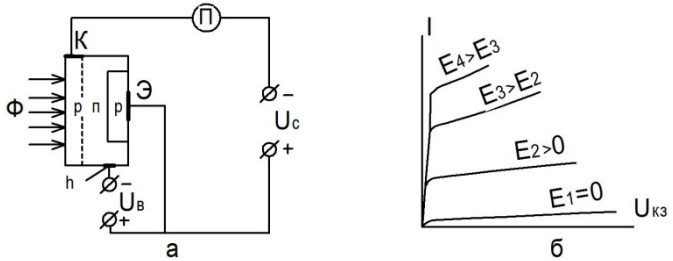



Рис. 2.8. Схема включения фототриода (*а*) и его вольт-амперная характеристика (*б*): К – коллектор; Э – эмиттер; Б – база; $U_б$ – напряжение смещения

Температурная характеристика фототриода аналогична температурной характеристике фотодиода. Фототриод по сравнению с фотодиодом имеет дополнительные возможности использования. Его работой можно управлять не только световым потоком, но и одновременно электрическим сигналом. Кроме того, фототриоды обладают более высокой чувствительностью, чем другие фотоэлементы.

Характерным параметром всех перечисленных датчиков является

так называемый темновой ток $I_T$, величина которого определяется проводимостью элемента при отсутствии светового потока. Для получения работоспособных схем необходимо, чтобы темновой ток был минимальным.

В практике наиболее широкое применение находят фоторезисторы, так как они имеют простую конструкцию, малые габариты, высокую чувствительность и неограниченный срок службы.

## 2.5. Датчики температуры

Температуру нагретого тела, жидкости, газа определяют измерением физических параметров или самой контролируемой среды, или находящегося с ней в тепловом контакте специального элемента, воспринимающего изменение температуры.

В практике в качестве датчиков температуры используют обычно такие термовоспринимающие элементы, которые существенно изменяют свои физические свойства в зависимости от температуры и незначительно подвержены влиянию других факторов, например, влажности, атмосферного давления, состава среды и т. п. В датчиках температуры широко применяют элементы, обладающие по возможности наибольшими значениями коэффициента теплового линейного или объемного расширения, температурного коэффициента сопротивления, термо-э.д.с., изменения интенсивности радиационных излучений, изменения давления, плотности и вязкости различных веществ в зависимости от температуры.

К датчикам, основанным на принципе теплового расширения жидкостей и газов, относятся жидкостные объемные и контактные термометры и манометрические термодатчики.

Жидкостные датчики состоят из стеклянной ампулы с капилляром и преобразуют изменение температуры $\Delta t$ в изменение высоты столба жидкости в капилляре (в мм), которая определяется по формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{S_k}, \qquad (2.24)$$

где $\Delta V = V(\beta - 3\alpha)\,\Delta t$ – изменение объема жидкости;

$S_k$ – сечение капилляра;

$\beta$ – температурный коэффициент линейного расширения жидкости;

$V$ – первоначальный объем жидкости;

α – температурный коэффициент линейного расширения материала ампулы и капилляра.

Входной величиной является температура жидкости, а выходной – высота столба жидкости, определяющая изменение омического, индуктивного и емкостного сопротивлений или изменение интенсивности светового потока.

Наиболее распространенные жидкостные датчики и реле температуры характеризуются простотой устройства и достаточной точностью измерения. Однако они недолговечны и не обеспечивают точности показаний в условиях вибраций (рис. 2.9).

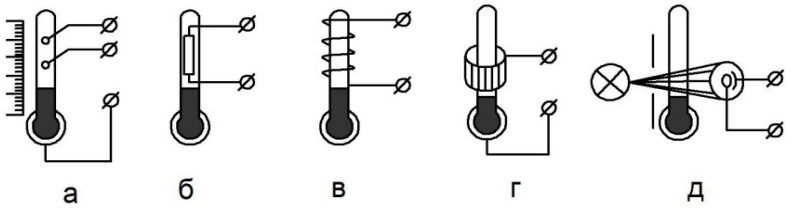



Рис. 2.9. Жидкостные датчики температуры

В манометрических датчиках температуры изменение объема жидкости и газа преобразуется в перемещение специальных мембран, сильфонов или манометрических трубок. На рис. 2.10 показаны схемы манометрических датчиков. Датчики состоят из теплоприемника *4*, соединительной капиллярной трубки *3* и измерительного элемента, представляющего собой специальную мембрану *2*, сильфон *5* или пружинную трубку *6*. Указательная стрелка, связанная с измерительным органом, движется по шкале температур *1*, замыкая контакты при предельных отклонениях температур.

Термодатчики манометрического типа позволяют осуществлять визуальное наблюдение за температурой контролируемой среды. Существенным их недостатком является значительная инерционность. Жидкостные термодатчики заполняются ртутью, ацетоном, эфиром, спиртом и их соединениями, а газовые – азотом и инертными газами. Погрешность датчиков составляет 1–2,5 %, пределы измерения ограничиваются температурами замерзания и кипения рабочей жидкости.

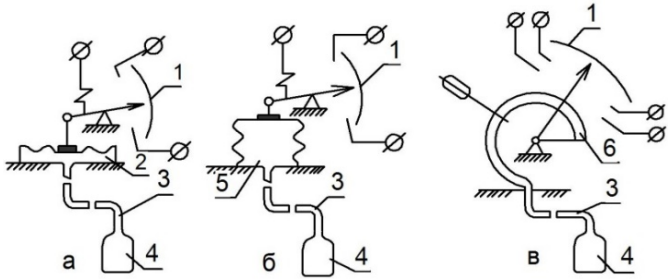



Рис. 2.10. Манометрические датчики температуры: *а* – мембранный; *б* – сильфонный; *в* – с манометрической пружинной трубкой

К датчикам, в основу которых положено свойство твердых тел изменять свои линейные размеры при изменении температуры, относятся биметаллические и дилатометрические реле температуры. На рис. 2.11 показана схема биметаллического термореле, воспринимающим органом которого служит биметаллическая спираль.

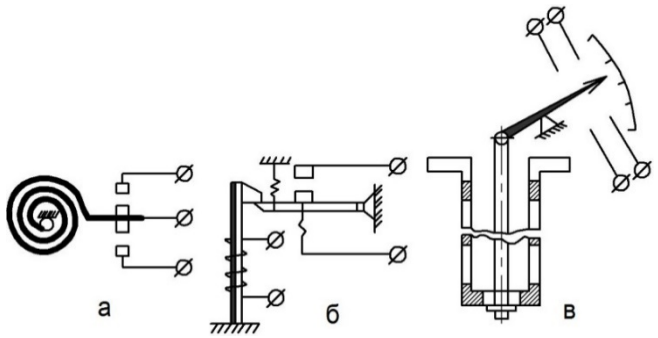



Рис. 2.11. Биметаллические и дилатометрические датчики и реле температуры: *а* – биметаллическое спиральное реле; *б* – биметаллическое пружинное реле с электроподогревателем; *в* – дилатометрический термодатчик

Пластины спирали при нагреве удлиняются неодинаково и поэтому происходит изгиб спирали в сторону металла с меньшим температурным коэффициентом. При определенной температуре контакты замыкаются. Существенным недостатком биметаллического термореле та-

кой конструкции является медленное и неплотное замыкание и размыкание контактов и как следствие этого – их подгорание. Для устранения этого недостатка изгиб биметаллической пластины обычно используется для освобождения пружины, воздействующей на размыкание или замыкание контактов.

У дилатометрического датчика стержень из металла с малым коэффициентом температурного расширения расположен внутри трубки, изготовленной из металла с большим коэффициентом теплового расширения, и одним концом жестко к ней прикреплен. Для уменьшения тепловой инерции в стенках трубки сверлятся отверстия. При изменении температуры трубка изменяет свою длину, вследствие чего происходит перемещение внутреннего стержня датчика. Со свободным концом стержня связана указательная стрелка.

Биметаллические и дилатометрические термодатчики не обеспечивают контроль за температурой точек, не доступных во время работы оборудования. Кроме того, им присущи большие погрешности, которые к тому же меняются в зависимости от внутренних деформаций металла. По этим причинам термодатчики подобного типа применяются ограниченно, в основном для защиты электродвигателей от перегрева. Ток электродвигателя проходит либо по самой биметаллической пластине, либо по расположенным рядом с ней нагревательным виткам.

Для дистанционного замера и контроля температур в пределах от -100 °С до 2000 °С применяют термопары. Термопара состоит из двух специально подобранных проволок, одни концы которых спаяны или сварены, а другие подключаются к вторичному прибору. Если спаянный конец нагреть, то на свободных концах появляется так называемая термо *э.д.с.,* величина которой пропорциональна разности температур нагретого и свободных концов и зависит от материала проволок. В качестве материалов используются благородные металлы: платина, иридий, золото и их сплавы, а также сталь, никель, хромель, копель, алюмель, константен и их сплавы. В последнее время большое распространение получили полупроводниковые термопары. Если для металлов величины термо *э.д.с.* составляют всего 0,006–0,06 мВ/град, то для полупроводниковых термопар они доходят до 0,1–1 мВ/град, т. е. превосходят первые в десятки раз.

Для измерения скорости изменения температуры применяются скоростные термопары, состоящие из двух последовательно соединенных термопар. На рис. 2.12 показана скоростная термопара, один спай которой помещен в термоизоляционную гильзу, а второй открыт.

Так как термопары соединены последовательно и встречно, то при неизменной температуре термо *э.д.с.* каждого спая взаимно равны и направлены навстречу друг другу.

При изменении температуры термо *э.д.с.* открытого спая будет следовать за изменением температуры безинерционно, а термо *э.д.с.* спая, помещенного в гильзу, из-за тепловой инерционности гильзы меняется с большим замедлением. Вследствие этого на выходе появится разность термо *э.д.с.,* величина которой пропорциональна скорости, а знак соответствует знаку изменения температуры.

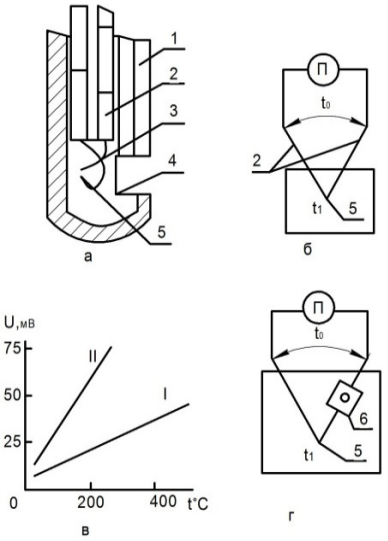



Рис. 2.12. Термопары и их характеристики: *а* – конструкция; *б* – схема включения; *в* – характеристика хромель-копелевой (I) и карбид кремния-графитовой (II) термопар; *г* – скоростная термопара; *1* – защитный корпус; *2* – изоляционные керамические трубки; *3* – проволоки; *4* – окно; *5* – горячий спай; *6* – термоизоляционная гильза для инерционного спая

Для того чтобы характеристика термопары $U = f(t)$ проходила через начало координат, температура свободных концов стабилизируется и поддерживается $t_0$ = 0 °С. Благодаря этому показания вторичного прибора (милливольтметра) зависят только от температуры контролируемой среды и не зависят от температуры точек присоединения прибора.

Термопары обладают существенными преимуществами перед дру-

гими датчиками температуры. Для них характерны эксплуатационная надежность, высокая точность измерений, простота конструкции, малая инерционность, возможность дистанционного наблюдения за температурой нескольких точек и ее записи с помощью вторичного прибора.

Принцип действия термометров сопротивления основан на использовании температурной зависимости сопротивлений металлов и полупроводников. Термометры сопротивления широко применяются в технике для измерения температур в пределах от – 200 до 700 $^{o}$C. Обладая теми же достоинствами, что и термопары, они, кроме того, позволяют получить на выходе большую мощность и хорошо согласуются со вторичными приборами. Проволока *1* металлических термометров сопротивления (рис. 2.13, *а*) изготовляется из чистых металлов (меди, железа, никеля, платины). Она наматывается на изоляционный каркас *2* и закрывается защитным кожухом *3*. Выводы *5* закреплены в изоляционной колодке *4*.

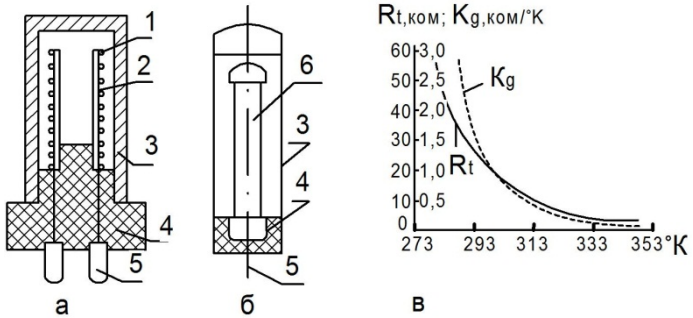



Рис. 2.13. Терморезисторы: *а* – металлический термометр сопротивления; *б* – полупроводниковый терморезистор типа КМТ-4 или ММТ-4; *в* – температурная характеристика КМТ-4 сопротивлением 30 кОм

Величина сопротивления проволоки (в Ом) следующим образом зависит от температуры:

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)], \tag{2.25}$$

где $R_0$ – сопротивление проволоки при температуре $t_0$;

$R_t$ – сопротивление проволоки при температуре $t$;

α – температурный коэффициент сопротивления, равный для металлов $(3{,}7 – 6{,}5)10^{-3}$.

Чувствительность металлического резистора (Ом/град):

$$k_{\text{д}} = \frac{dR_t}{dt} = R_0\alpha. \qquad (2.26)$$

Сейчас в практике наиболее распространены полупроводниковые терморезисторы (ПТР), воспринимающий орган *6* которых изготавливается из полупроводниковых материалов. ПТР обладают значительно большей чувствительностью и меньшими габаритами, и инерционностью, чем металлические терморезисторы.

Имеются специальные герметизированные ПТР, которые могут работать в агрессивных средах и жидкостях.

Зависимость сопротивления терморезисторов от температуры (в Ом) показана на рис. 2.13, *в* и определяется уравнением:

$$R_t = R_\infty \mathrm{e}^{\frac{B}{T}}, \qquad (2.27)$$

где $T$ – температура, ºK;

$R_\infty$ – сопротивление терморезистора при $T \to \infty$, Ом;

$B$ – постоянный коэффициент, характеризующий термочувствительность полупроводникового резистора.

Чувствительность полупроводникового резистора (Ом/град):

$$k_{\text{д}} = \frac{dR_t}{dt} = \alpha R_t. \qquad (2.28)$$

Величину α называют температурным коэффициентом терморезистора, который определяется по формуле:

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}. \qquad (2.29)$$

Этот коэффициент для полупроводниковых резисторов отрицателен, зависит от температуры и по величине в 10–15 раз выше, чем у металлических резисторов.

Большая величина сопротивления полупроводниковых резисторов и их температурного коэффициента α дают возможность практически не считаться с сопротивлениями контрольной проводки и контактов.

Это обеспечивает высокую точность измерений малых отклонений температуры на больших расстояниях.

В радиационных термодатчиках используются зависимости интенсивности и спектрального состава излучения от температуры излучающего тела. Они не имеют непосредственного контакта с объектом, температура которого измеряется, и поэтому температурное поле объекта не искажается. Радиационные термодатчики отличаются от рассмотренных ранее относительной сложностью устройства и высокой стоимостью. Они применяются для измерения температур выше 800 °С и не имеют верхнего температурного предела. В сельском хозяйстве они используются редко.

## 2.6. Электромеханические датчики уровня, давления, расхода и скорости потока

**Датчики уровня.** Контроль уровня жидкости осуществляется при помощи поплавковых, гидростатических и электродных датчиков уровня.

Поплавковые датчики состоят из поплавка, воспринимающего изменения уровня жидкости, и элемента, преобразующего перемещения или усилия в выходной электрический сигнал. В качестве преобразователей используются омические или индуктивные датчики. На рис. 2.14, *а* показана схема поплавкового датчика уровня с потенциометрическим преобразователем перемещения.

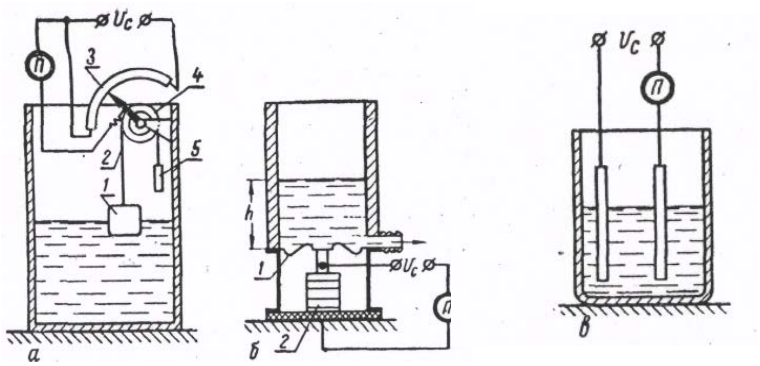



Рис. 2.14. Датчики уровня: *а* – поплавковый; *б* – гидростатический; *в* – электродный

Связь пустотелого поплавка *1* с потенциометрическим датчиком *3*

осуществляется с помощью гибкого троса *2*, перекинутого через блок *4*. Вес поплавка уравновешивается грузом *5*. Всякое изменение уровня жидкости вызывает пропорциональное ему изменение напряжения вторичного измерительного прибора, который проградуирован в единицах уровня. Поплавковые датчики уровня используются для замера уровней, изменяющихся в широких пределах. Недостатком их является наличие подвижных частей.

Гидростатические датчики реагируют на изменения гидростатического веса жидкости в специальном цилиндрическом сосуде, сообщающемся с резервуаром, уровень жидкости в котором контролируется. Давление жидкости, пропорциональное ее уровню *h*, вызывает изгиб мембраны *1*. Величина изгиба мембраны преобразуется устройством, например угольным столбиком *2* в электрический сигнал, который измеряется прибором *П*, проградуированным в единицах уровня.

Электродные датчики уровня состоят из одного или нескольких электродов, погруженных в жидкость. При изменении уровня жидкости изменяется активная и емкостная проводимости междуэлектродного пространства. Схема электродного датчика уровня, основанного на измерении активной проводимости жидкости, показана на рис. 2.14, *в*.

Измерение уровня сыпучих материалов значительно сложнее, чем измерение уровня жидкостей. Это объясняется тем, что большинство сельскохозяйственных сыпучих материалов обладает значительным электрическим сопротивлением и при заполнении или опорожнении емкостей не образует горизонтальной поверхности. Кроме того, при загрузке возможны повреждения чувствительных элементов датчиков.

Поплавковые датчики для замера уровня сыпучих материалов снабжаются специальными механическими приспособлениями, которые вызывают вибрацию поплавка или периодическое перемещение его вверх и вниз. Под действием вибраций и вертикальных перемещений поплавок всплывает и находится на поверхности сыпучего материала.

Для электродного датчика характерны высокая точность измерений, низкая стоимость и простая конструкция, позволяющая дистанционно замерять уровень зерна в небольших объемах.

**Датчики давления.** К этой группе датчиков относятся многочисленные типы приборов для измерения сил давлений жидкостей и газов. Большинство датчиков давления преобразуют силы давления в механическое перемещение или усилие. Воспринимающие органы таких датчиков подвергаются непосредственному действию измеряемого давления.

Для измерения давлений выше 1000 кг/см$^2$ применяются датчики

другого вида, в которых используется явление изменения электрического сопротивления проводников и полупроводников под действием давления. Датчики, контролирующие малые давления газов, реагируют на изменение их вязкости, теплопроводности, степени ионизации и т. п.

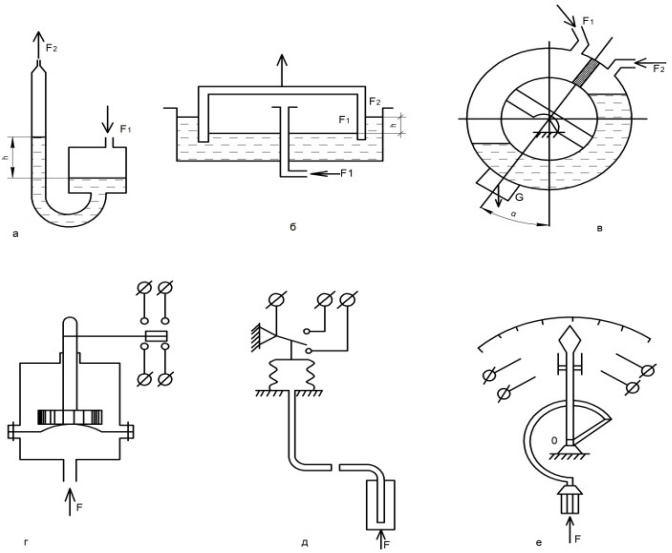



Рис. 2.15. Датчики давления с механическими воспринимающими органами:
*а* – жидкостный с U-образной системой; *б* – жидкостный с колокольной системой;
*в* – гидростатический (дифференциальный); *г* – мембранный; *д* – сильфонный;
*е* – с манометрической трубкой

В сельскохозяйственной технике наибольшее распространение получили датчики с механическими воспринимающими органами: жидкостные, поршневые, мембранные, сильфонные, с манометрическими трубчатыми пружинами (рис. 2.15).

Жидкостные датчики давления подразделяются на: U-образные, колокольные и гидростатические, или дифференциальные.

В U-образной системе разность давлений $\Delta F = F_1 - F_2$ уравновешивается весом столба жидкости:

$$\Delta F = \gamma\, h, \tag{2.30}$$

где $\gamma$ – удельный вес жидкости.

В колокольной системе избыточное давление $\Delta F = F_1 - F_2$ вызывает перемещение колокола, по величине которого определяется давление $F_1$.

В дифференциальной системе угол поворота α камеры кольцевых весов пропорционален разности давлений $\Delta F = F_1 - F_2$.

Жидкостные датчики давления являются наиболее точными и стабильными. Однако вследствие эксплуатационных неудобств (малые пределы измерения, необходимость строго вертикального положения, большие габариты и т. п.) они в последнее время вытесняются другими, более совершенными типами датчиков давления.

В поршневых датчиках поршень, находящийся под давлением контролируемой среды, вызывает сжатие специальной калиброванной пружины. Датчики этого типа не находят широкого применения из-за таких существенных недостатков, как наличие зазора между поршнем и цилиндром и возможность застопоривания поршня. Однако благодаря высокой стабильности поршневые датчики применяются для тарировки манометрических систем других типов.

В мембранных датчиках эластичная пластина (мембрана), находясь под давлением контролируемой среды, перемещает шток, жестко связанный с контактной системой. Простота конструкции, надежность, достаточная точность измерений обусловили широкое распространение датчиков этого типа.

Сильфонные датчики представляют собой гофрированные тонкостенные трубки, выполненные из упругого материала. Разность наружного и внутреннего давлений создает силу, под действием которой происходит растяжение или сжатие сильфона. Перемещение свободного конца сильфона передается указательной стрелке и подвижным контактам.

Принцип работы датчика с манометрической трубчатой пружиной заключается в следующем: изогнутая по дуге тонкостенная упругая трубка, имеющая овальное сечение, стремится выпрямиться при увеличении давления контролируемой среды внутри ее.

Перемещение свободного конца трубки приводит в действие указательную стрелку, связанную с контактной системой.

**Датчики расхода.** Одним из наиболее распространенных методов измерения расхода непрерывно текущих жидкостей и газов является метод измерения по перепаду давления в дроссельных устройствах (рис. 2.16).

В качестве дроссельных устройств применяются диафрагмы, сопла и трубы Вентури.

На рис. 2.16, *а* показана схема датчика расхода жидкости с дросселем-диафрагмой. В трубопровод вставляется диафрагма *2*. По обе стороны диафрагмы находятся две импульсные трубки. Сопротивление *R* в одной из них шунтируется жидкостью, обеспечивая тем самым пропорциональность между перепадом давления и током во вторичном приборе *3*:

$$I_{\text{п}} = \alpha(P_1 - P_2) = \alpha\Delta P. \qquad (2.31)$$

Соотношение между перепадом $\Delta P$ и расходом $Q$ (в м$^3$/с) определяется следующим уравнением:

$$Q = \alpha_{\text{р}} S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} = \Delta P, \qquad (2.32)$$

где $S_{\text{о}}$ – сечение отверстия диафрагмы, м$^2$;

$\gamma$ – удельный вес среды, кг/м$^3$;

$\alpha_{\text{р}}$ – коэффициент расхода, величина которого зависит от геометрической формы сужающего устройства и от числа Рейнольдса;

$\alpha$ – коэффициент пропорциональности;

$g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$.

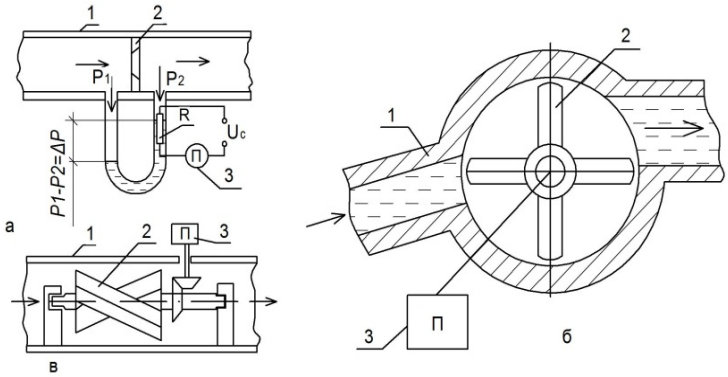



Рис. 2.16. Датчики расхода: *а* – переменного перепада; *б* – скоростной с вертикальной крыльчаткой; *в* – скоростной со спиральной крыльчаткой

На рис. 2.16, *б*, приведены схемы скоростных датчиков расхода. Они применяются как счетчики расхода воды, жидкого топлива, газа и других веществ.

В **скоростном датчике** расхода с вертикальной крыльчаткой жидкость, протекающая через датчик, приводит во вращение вертушку *2*, число оборотов которой пропорционально скорости потока (в об/с):

$$n = \mathrm{a}V = \mathrm{a}\frac{Q}{S}, \qquad (2.33)$$

где а – коэффициент пропорциональности;

$V$ – скорость жидкости, м/с;

$Q$ – расход жидкости, м$^3$/с;

$S$ – рабочее сечение датчика, м$^2$.

Датчики со спиральной вертушкой *2* используются для учета значительных расходов жидкости. В отличие от других типов датчиков расхода они могут работать и в наклонных участках трубопроводов. Число оборотов спиральной вертушки пропорционально расходу $Q$ и обратно пропорционально шагу лопасти $\Delta l$ (в об/с):

$$n = \mathrm{a}\frac{Q}{S\Delta l}. \qquad (2.34)$$

Обороты датчиков измеряются прибором *3*, проградуированным в единицах расхода.

Конструктивное исполнение вышеописанных и ряда других датчиков неэлектрических величин, и их характеристики приводятся в специальной литературе.

### 2.6.1. Методы измерения расхода воды

Средство измерения (прибор учета, расходомер) – техническое средство, предназначенное для измерений. Имеет нормированные метрологические характеристики, умеет хранить и/или воспроизводить некую измеренную физическую величину в пределах установленной погрешности. В данном случае основным значением измерения является объем протекающей жидкости.

Первичный преобразователь расхода – составная часть средства измерения, обеспечивающая первичное измерение параметров протекающей жидкости и передающая их на вторичный преобразователь.

Вторичный преобразователь расхода – составная часть средства

измерения, принимающая информацию о параметрах протекающей жидкости от первичных преобразователей и вычисляющая непосредственно расход. Именно вторичный преобразователь хранит и/или воспроизводит информацию об объеме протекающей жидкости.

Рассмотрим наиболее распространенные методы измерения напорных потоков.

Для определения расхода в напорных потоках достаточно измерять один параметр протекающей жидкости – скорость. Площадь сечения всегда известна и ограничена стенками водовода. Расход определяется путем перемножения скорости потока жидкости на площадь проходного сечения. Различают следующие методы определения расхода:

– тахометрический метод;
– метод переменного перепада давления;
– ультразвуковой времяимпульсный метод;
– электромагнитный (магнитоиндукционный) метод.

Ультразвуковой времяимпульсный метод – зачастую называют просто «ультразвуковой», хотя это не совсем верно, поскольку ультразвуковых методов измерения расхода несколько. Как правило, в водовод монтируется минимум два пьезоэлектрических преобразователя друг напротив друга под углом 45°, которые попеременно работают как излучатель и приемник. Принцип действия данного метода основан на измерении скорости прохождения ультразвукового сигнала от излучателя до приемника, при этом скорость прохождения сигнала по потоку жидкости выше, чем против потока. Возможно исполнение как с врезными в стенки водовода датчиками, так и с накладными датчиками.

Преимущества: относительная универсальность – устанавливаются в водоводы диаметром от 15 мм до 5000 мм; возможно измерение агрессивных сред при использовании накладных датчиков; возможна высокая точность при измерении однородной среды без взвесей и пузырьков.

Недостатки: высокие требования к обслуживанию врезных датчиков – периодическая очистка; высокие требования к обслуживанию накладных датчиков периодическая замена акустического геля и очистка внутреннего сечения водовода измерительного участка; низкая стабильность измерений при насыщении измеряемой среды взвесями и пузырьками, вплоть до полной недостоверности. Погрешность: ±0,5–2 %.

Ультразвуковые колебания (частота выше 20 кГц), нашедшие широкое применение в различных отраслях техники, в том числе и изме-

рительной, могут быть применены и для целей измерений расхода жидкостей и газов вне зависимости от электрических свойств измеряемой среды.

Ультразвуковой метод измерения расхода основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой. Поэтому, когда колебания распространяются по направлению скорости потока, они тем быстрее достигают заданной (приемной) точки, чем больше скорость или расход потока.

Имеется несколько путей выявления разности времени дельта $\tau$ для определения скорости $x$:

– метод измерения разности фазовых сдвигов двух ультразвуковых колебаний, направляемых по потоку и против него;

– метод измерения разности частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него;

– метод измерения разности времени прохождения коротких импульсов, направляемых одновременно по потоку и против него.

Кроме того, имеется еще четвертый метод определения скорости потока $x$, который основан не на выявлении разности времен дельта $\tau$, а на смещении потоком ультразвукового колебания, направляемого перпендикулярно оси трубы.

Устройство преобразователя и измерительной схемы ультразвукового расходомера, равно как и характер его работы, сильно зависят от того, производится ли излучение ультразвуковых колебаний по потоку и против него по одному или по двум разным электроакустическим каналам. В связи с этим ультразвуковые расходомеры разделяются на:

- однолучевые или одноканальные;
- двухлучевые или двухканальные.

В первом случае преобразователи несколько проще, но измерительные схемы, как правило, сложнее, так как возникает необходимость в запоминающем устройстве и в переключении пьезоэлементов с излучения на прием. Кроме того, возникают трудности в фазометрических измерительных схемах в связи многозначностью шкалы фазометров. С другой стороны, в двухлучевых приборах будут возникать погрешности, если в обоих электроакустических каналах будут наблюдаться неодинаковые температуры или различный состав среды. Фазовые расходомеры бывают как однолучевые, так и двухлучевые; частотные и импульсные расходомеры, как правило, изготовляются двухлучевыми.

Достоинства ультразвуковых расходомеров:

– возможность измерения расхода любых жидкостей (не содержащих газовых включений), в том числе агрессивных и вязких, в любых трубах, имеющих диаметр, начиная от 10 до 2000 мм и выше, при скоростях 0,02 м/с и выше;

– принципиальная возможность измерения расхода газа;

– высокое быстродействие, позволяющее измерять расходы, меняющиеся с частотой до 10 кГц;

– бесконтактность приемных устройств;

– очень небольшая величина или даже полное отсутствие дополнительной потери давления.

К недостаткам рассматриваемых приборов следует отнести:

– относительную сложность их измерительной схемы;

– зависимость показаний от плотности среды.

В первую очередь эти приборы должны применяться в тех случаях, где трудно использовать расходомеры других типов, например при измерении расхода агрессивных сред и пульп, неэлектропроводных жидкостей, больших расходов воды, например в гидротурбинах.

### 2.6.2. Вихревые расходомеры

Вихревыми называются расходомеры, расход которых зависит от частоты колебания давления. Колебания давления возникают в потоке в процессе вихреобразования или колебания струи либо после препятствия определенной формы, установленного в трубопроводе, либо специального закручивания потока.

Первые вихревые расходомеры жидкости появились в шестидесятых годах в США, Японии и СССР. Первые разработки вихревых расходомеров газа и пара в России относятся к 90-м годам прошлого века.

По типу преобразователя вихревые расходомеры можно разделить на три группы:

1. Расходомеры, первичным преобразователем расхода которых является неподвижное тело. В них, после обтекания неподвижного тела, с обеих сторон по очереди возникают срывающиеся вихри, которые и создают пульсацию.

2. Расходомеры, в первичном преобразователе которых поток закручивается и, попадая в расширенную часть трубы, принимая воронкообразную форму (прецессирует) создает пульсации давления.

3. Расходомеры, в которых в качестве первичного преобразователя выступает струя.

Пульсации давления в этом случае создаются автоколебаниями струи при вытекании ее из отверстия.

Строго говоря, термин вихревой расходомер применим только к приборам первых двух групп. Но так как у расходомеров третьей группы движение потока определяется колебательным характером изменения параметров, их тоже можно отнести к вихревым расходомерам. В первой и третьей группах расходомеров характеры протекания процессов будут наиболее похожими. Поток, огибая тело, меняет направление движения обтекающих струй и увеличивает их скорость, при этом соответственно уменьшается давление (рис. 2.17). Далее за миделевым сечением тела происходит уменьшение скорости и увеличение давления. Одновременно на передней стороне тела образуется повышенное давление, а на задней стороне тела - пониженное давление. Пограничный слой, пройдя миделево сечение тела, отрывается от него и под воздействием пониженного давления, которое образуется за телом, меняет направление движения, создавая вихрь. Это происходит и в верхних, и в нижних частях обтекаемого тела. Образование вихрей с обеих сторон происходит поочередно, так как вихрь с одной стороны мешает образованию вихря с другой. При этом за обтекаемым телом образуется вихревая дорожка Кармана (по имени фон Кармана, описавшего это явление в 1912 году). Рабочие кромки тела обтекания являются самоочищающимися за счет образования вихрей, и остаются чистыми в условиях сильно загрязненных сред. Загрязнение датчика вихрей не ведет к изменению метрологических характеристик вихревого расходомера, так как полезную информацию несет частота, а не амплитуда сигнала.

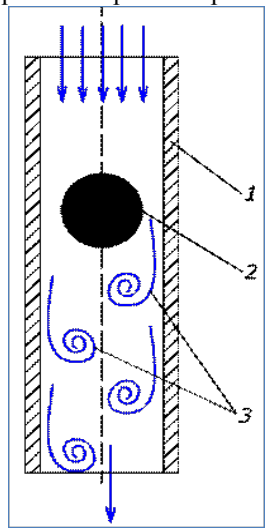



Рис. 2.17. Вихревой расходомер с обтекаемым телом: *1* – трубопровод; *2* – тело обтекания круглой формы; *3* – вихри

Частота срыва вихрей пропорциональна отношению скорости потока к размерам тела обтекания. При постоянном характерном размере тела частота пропорциональна скорости, а значит и объемному расходу.

Если при минимальном расходе вещества скорость в трубе будет достаточной для устойчивого образования вихрей, то расходомер с цилиндрическим обтекаемым телом может иметь диапазон измере-

ния 20. Чаще всего в вихревых расходомерах применяют призматические тела прямоугольной, треугольной или трапецеидальной (дельтообразной) форм. У последних основание обращено навстречу потоку. Такие тела, несмотря на небольшую потерю давления, образуют сильные и регулярные вихревые колебания. Кроме того, они удобны для преобразования частоты в выходной сигнал.

У некоторых вихревых расходомеров для увеличения выходного сигнала применяют два обтекаемых тела, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. У ряда приборов тела обтекания – прямоугольные призмы. На боковых гранях второй призмы по потоку устанавливаются защищенные плоскими гибкими мембранами пьезоэлементы, что исключает влияние шумовых помех. В таких расходомерах используется несколько вариантов преобразования вихревых колебаний потока в выходной сигнал. В основном используются периодические колебания давления или скорости струй с двух сторон обтекаемого тела. Один или два полупроводниковых термоанемометра являются чувствительным элементом преобразователя. В вихревых расходомерах различных фирм применяют следующие типы преобразователей расхода: индуктивный, емкостной, струнный, интегрирующий, ультразвуковой и т. д.

На рис. 2.18 показана схема преобразователя с телом обтекания треугольной формы, которое вибрирует в направлении, перпендикулярном к потоку, под влиянием пульсации давлений на его боковых сторонах.

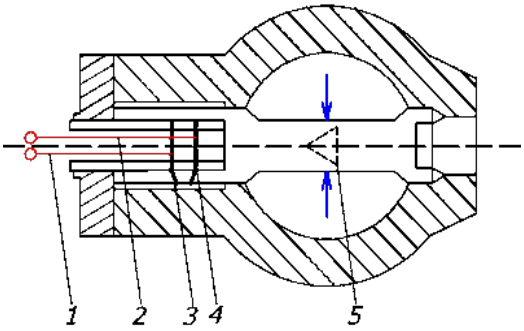



Рис. 2.18. Преобразователь вихревого расходомера с пьезоэлементами:
(*1, 2* – электроды; *3, 4* – пьезоэлементы; *5* – обтекаемое тело)

Изгибные напряжения воспринимаются пьезоэлементами. Электроды пъезодатчиков включают навстречу друг другу, для того чтобы вредные вибрации тела обтекания и трубопровода в меньшей степени влияли на выходной сигнал (разности напряжений). Такой преобразователь можно применять в различных условиях измерения (при температурах до 400 °С и давлениях до 15 МПа).

Вихревые расходомеры с телом обтекания треугольного, трапецеидального и квадратного типов предназначены для труб диаметром от 50 до 300 мм, погрешность измерения составляет ±0,5–2 %.

Важно помнить: перед вихревым расходомером с обтекаемым телом нужно иметь прямой участок трубы. Использование вихревых расходомеров для труб большого диаметра (300–350 мм) затруднено: вследствие совпадения частоты свободных колебаний тела с частотой срыва вихрей, из-за низкой эффективности вихреобразования, при малых значениях относительного диаметра обтекаемого тела и неприемлемости больших его значений, из-за громоздкости и уменьшения частоты.

### 2.6.3. Вихревые расходомеры с процессией воронкообразного вихря

Преобразователи этих расходомеров имеют приспособление, закручивающее поток, направляемый затем через короткие цилиндрические насадки или участок трубы в ее расширенную часть. В трубе вращающийся поток принимает воронкообразную форму, а его ось, вокруг которой вращается ядро вихря, сама вращается вокруг оси трубопровода. При этом давление на внешней поверхности вихревого потока пульсирует синхронно с угловой скоростью вращения ядра вихря, пропорциональной линейной скорости потока или объемному расходу.

Для преобразования частоты пульсаций давления или скорости в измерительный сигнал применяются пьезоэлементы или полупроводниковые термоанемометры. Преобразователь состоит из двух ступеней: в 1-й происходит преобразование объемного расхода потока в частоту прецессии воронкообразного вихря, а во 2-й – преобразование этой частоты в измерительный сигнал.

Две возможные принципиальные схемы первой ступени преобразователей таких расходомеров представлены на рисунке 2.19, *а*, *б*, отличающиеся лишь способом закручивания потока. На рис. 2.19, *б* жидкость или газ по трубе *1* входит тангенциально (т. е. по касательной) в цилиндрическую камеру *4*, где закручивается и, через патрубок *3*, по-

ступает в трубу или камеру большего диаметра *2*. Там поток прецессирует, что сопровождается пульсациями скорости и давления. На рис. 2.19, а поток вещества закручивается по спирально расположенным лопаткам.

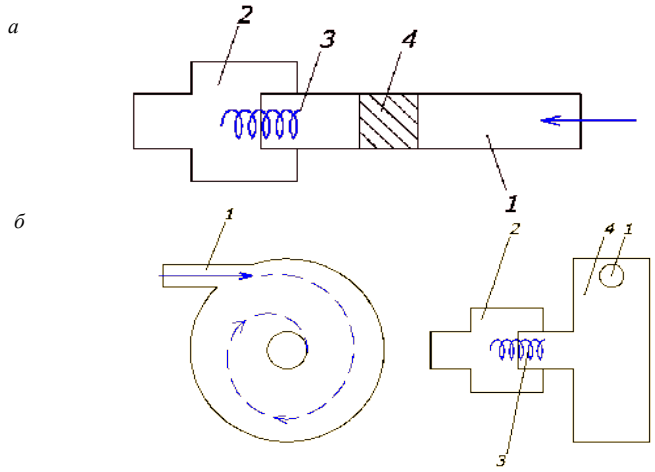



Рис. 2.19. Схемы первой ступени вихревых преобразователей: *а* – с винтовым завихряющим устройством; *б* – с тангенциальным вводом в камеру

В остальном схемы одинаковы. Чаще всего в расходомерах применяют завихряющее винтовой устройство, так как оно не требует перед собой прямых участков трубы. Однако, потеря давления в этом завихряющем устройстве выше.

### 2.6.4. Вихревые расходомеры с осциллирующей струей

Преобразователь с осциллирующей струей может быть двух видов.

Как показано на рис. 2.20, поток жидкости или газа проходит через сопло и попадает в диффузор прямоугольного сечения.

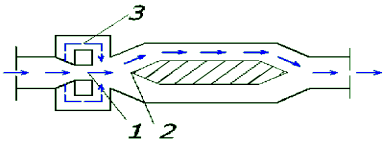



Рис. 2.20. Преобразователь с осциллирующей струей: *1* – сопло; *2* – диффузор; *3* – обводная трубка

Вследствие случайных причин поток в каждый момент в большей степени прижимается к той или другой стенке диффузора (например к верхней), и благодаря эжектирующему действию струи в преобразователе релаксационного типа давление в верхней части обводной трубки станет меньше давления в нижней ее части и по трубке возникнет движение, показанное стрелкой, которое перебросит струю к нижней стенке диффузора. Далее направление движения в обводной трубке изменится, и струя будет осциллировать.

В преобразователе с обратной гидравлической связью струя, прижатая к нижней стенке диффузора, не вся удаляется через выходной патрубок. Часть ее ответвляется в верхний обводной канал и, выходя через сопло *1*, перебрасывает струю, выходящую из сопла *2*, в нижнее положение (рис. 2.21). После этого произойдет ответвление части струи в верхний обводной канал, струя будет переброшена вниз и наступит процесс ее колебаний, сопровождающийся синхронными колебаниями давлений с обеих сторон струи. Последний преобразователь с обратной связью лучше. Он обеспечивает более строго процесс осцилляции и имеет почти линейную зависимость между расходом и частотой колебания.

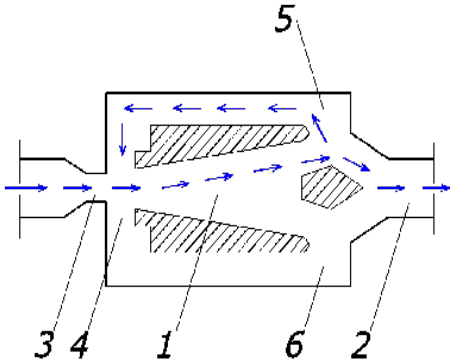



Рис. 2.21. Преобразователь вихревого расходомера с колеблющейся струей с обратной гидравлической связью: *1* – дифузор; *2* – выходной парубок; *3* – сопло 1; *4* – сопло 2; *5* – верхний отводной канал; *6* – нижний обводной канал

Расходомеры с осциллирующей струей обычно используют в трубах меленьких диаметров: от 12 до 100 мм. Иногда преобразователи с

осциллирующей струей могут применять в качестве парциальных преобразователей.

К достоинствам таких расходомеров следует отнести:

– простоту и надежность преобразователя расхода;

– отсутствие подвижных частей;

– большой диапазон измерений;

– линейный измерительный сигнал;

– достаточно высокую точность измерения;

– стабильность показаний;

– независимость показаний от давления и температуры;

– сравнительная несложность измерительной схемы;

– возможность получений универсальной градуировки.

Недостатки вихревых расходомеров:

– невозможно использовать при малых скоростях потока (трудно измерять сигналы с маленькой частотой колебаний);

– значительная потеря давления (может достигнуть 30–50 кПа);

– изготавливают для труб, имеющих диаметр от 25 до 150–300 мм (применение в трубах большего диаметра затруднительно, а в трубах меньшего диаметра вихреобразование нерегулярно);

– работу вихревых расходомеров могут нарушать акустические и вибрационные пульсации (такие помехи создаются различными источниками: насосами, компрессорами, вибрирующими трубами и т. д.).

Устранить помехи можно:

– установив электрические фильтры (если частоты вредных пульсаций и измерительного сигнала разные);

– с помощью струевыпрямителя (его устанавливают на выходе преобразователя);

– установив дополнительный преобразователь, который подключают встречно первому.

Сферы применения вихревых расходомеров:

– химическая;

– нефть и газ;

– водоснабжение и водоотведение;

– нефтехимическая;

– пищевые продукты и напитки: рафинадные заводы; пивоваренные заводы; молочные заводы; производство безалгокольных напитков;

– электростанции: воздух; поглощение тепла; обогрев; охлаждение.

Несмотря на довольно продолжительное время освоения этих приборов в измерительной технике, теория и практика вихревых расходомеров непрерывно развивается и совершенствуется. Идут поиски лучших схемных решений, более эффективных и технологичных конструкций первичных преобразователей расхода.

### 2.6.5. Электромагнитный расходомер

Электромагнитный (магнитоиндукционный) метод – наиболее универсальный на текущий момент метод измерения напорных потоков. Принцип действия основан на измерении электродвижущей силы (*э.д.с.*), возникающей в потоке жидкости, протекающей через искусственно созданное магнитное поле, при этом *э.д.с.* прямо пропорциональна скорости потока жидкости. Этот метод был предложен Майклом Фарадеем еще в начале XIX века. Первичный преобразователь, как правило, представляет из себя полнопроходное измерительное сечение с электромагнитами (для создания магнитного поля) и парой электродов, расположенных диаметрально противоположно в измерительном сечении для съема *э.д.с.*

Преимущества:

– универсальность – измерению подлежат любые токопроводящие
– жидкости;
– высокая точность и стабильность измерений (в случае наличия системы самоочистки электродов);
– низкие требования к качеству измеряемой среды – данный метод используется, в том числе, для измерения объема неочищенных сточных вод;
– полнопроходное сечение обуславливает отсутствие потерь давления в водоводе.

Недостатки:

– стоимость зависит от диаметра водовода – исполнение первичного преобразователя всегда полнопроходное;
– возможна нестабильность измерений при наведении сильных
– электромагнитных помех.

Погрешность: ±0,25–2 %.

Основываясь на опыте организации узлов учета напорных потоков, можно утверждать, что наиболее универсальным и востребованным является именно электромагнитный метод измерения.

В зависимости от поставленной метрологической задачи возможно применение различных методов измерения, однако необходимо всегда учитывать имеющиеся технические условия на объекте измерения и продумывать мероприятия по дальнейшему обслуживанию и эксплуатации средств измерения.

Принцип действия электромагнитных расходомеров (ЭМР) основан на измерении *э.д.с.*, индуктируемой в потоке электропроводной жидкости (кислоты, щелочи, соли) под действием внешнего магнитного поля.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 2.22. Корпус *1* с цилиндрической вставкой из немагнитного материала (фторопласта, эбонита и др.), с перемещающейся в нем жидкостью, расположен между полюсами *2* и *3* магнита перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля. В стенки трубопровода диаметрально противоположно (заподлицо с внутренней поверхностью трубы) заделаны измерительные электроды. Под действием магнитного поля ионы, находящиеся в жидкости, перемещаются и отдают свои заряды измерительным электродам электромагнитного расходомера, создавая в них *э.д.с.* *E*, пропорциональную скорости течения жидкости. К электродам подключен измерительный прибор *4*, шкала которого отградуирована в единицах расхода.

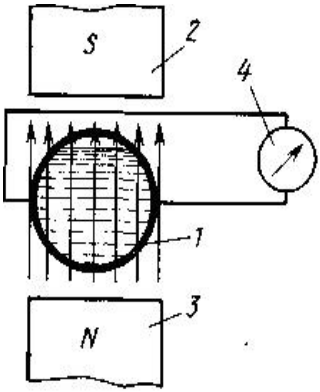



Рис. 2.22. Принципиальная схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитом

Величина *э.д.с.* в случае постоянного магнитного поля определяется основным уравнением электромагнитной индукции (в вольтах):

$$E = BdV_{ср}, \qquad (2.35)$$

где $B$ – магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита, Тл;

$d$ – внутренний диаметр трубопровода (длина проводника), м;

$V_{ср}$ – средняя скорость потока жидкости, м/с.

Выразив скорость через объемный расход $Q$, получим (для трубопровода круглого сечения):

$$E = 4QB/(\pi d). \qquad (2.36)$$

Из этой формулы следует, что при однородном магнитном поле *э.д.с.* прямо пропорциональна объемному расходу.

Электромагнитные расходомеры применяют лишь для жидкостей с электрической проводимостью не ниже $10^{t3}$ – $10^{t5}$ см/м. Основные недостатки электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем:

– возникновение на электродах гальванической *э.д.с.* и *э.д.с.* поляризации затрудняют или делают невозможным правильное измерение *э.д.с.*, индуктируемой магнитным полем в движущейся жидкости;

– трудность усиления напряжения постоянного тока.

В связи с этим расходомеры с постоянным магнитным полем применяют лишь при измерении расхода жидких металлов, пульсирующих потоков жидкости и при кратковременных измерениях, когда поляризация не успевает оказать заметного влияния.

При переменном магнитном поле электрохимические процессы оказывают меньшее влияние, чем при постоянном, поэтому в настоящее время в электромагнитных расходомерах применяют переменное магнитное поле. Если магнитное поле изменяется во времени с частотой, то *э.д.с.* для трубопроводов круглого сечения (в вольтах):

$$E = B_{макс}dv_{ср}\sin\omega t. \qquad (2.37)$$

Подставив значение скорости потока из уравнения объемного расхода, получим:

$$E = (4Q/\pi d)\, B_{макс}\sin\omega t, \qquad (2.38)$$

где $B_{макс} = B/\sin\omega t$ – амплитудное значение магнитной индукции, Тл;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

$t$ – время, с.

В современных электромагнитных расходомерах (ЭМР) для усиления сигнала, снимаемого с преобразователя, используют электронный усилитель с большим входным сопротивлением. При этом условии в большинстве случаев изменение сопротивления преобразователя при изменении параметров контролируемой среды не сказывается на показаниях. Это важное преимущество электромагнитных расходомеров.

В расходомерах с переменным магнитным полем возникают помехи как в преобразователе, так и вне его (рис. 2.23).

В основном на погрешность измерения влияют помехи:

– паразитные (от внешних цепей);

– емкостные (от переменного тока, питающего электромагнит);

– индукционные (трансформаторные, от магнитного поля преобразователя).

Первые две помехи удается устранить экранированием прибора.

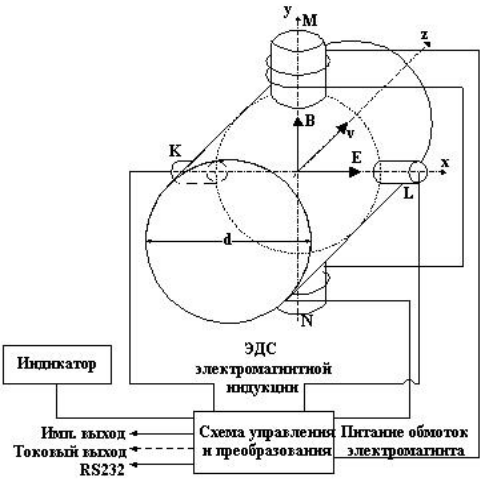



Рис. 2.23. Принципиальная схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем

В преобразователе электромагнитного расходомера (ЭМР) столб жидкости между электродами и выводы электродов, замкнутые через

измерительный прибор, образуют контур, в котором, как в обмотке трансформатора, переменное магнитное поле наводит трансформаторную *э.д.с.*, не зависящую от скорости движения жидкости или расхода (в вольтах)

$$ET = S2\pi f B_{\text{макс}} \cos(2\pi f t), \qquad (2.39)$$

где $S$ – площадь контура, перпендикулярного магнитному полю.

Из этого выражения видно, что трансформаторная *э.д.с.* пропорциональна частоте тока и сдвинута по фазе относительно полезного сигнала на угол 90°. При снижении частоты до 10 Гц трансформаторную *э.д.с.* удается свести к минимуму. Однако снижение частоты значительно усложняет прибор. Получили распространение электромагнитные расходомеры (ЭМР), работающие на промышленной частоте (50 Гц).

Для исключения трансформаторной *э.д.с.* используют различные способы. Один из способов заключается в применении двух индукционных преобразователей (с самостоятельными магнитами), включенных таким образом, что магнитные поля в них направлены в противоположные стороны. Дополнительные *э.д.с.* взаимоиндукции при этом (как равные по величине и по фазе, но противоположные по направлению) взаимно уничтожаются в первичной обмотке выходного трансформатора.

Комплект общепромышленного электромагнитного расходомера ЭМР состоит из преобразователя расхода и измерительного блока. Конструктивно преобразователь включает два узла – трубу и электромагнит. Преобразователь содержит также контур для уменьшения трансформаторной *э.д.с.*

Усиление и унифицирование электрических сигналов, поступающих с преобразователя расходомера, осуществляется в измерительном блоке. Наличие унифицированного электрического выходного сигнала позволяет применять различные вторичные приборы контроля.

Электромагнитные расходомеры имеют ряд преимуществ. Прежде всего они практически безынерционны, что очень важно при измерении быстро меняющихся расходов и при использовании в системах автоматического регулирования. На результат измерения не влияет наличие взвешенных частиц в жидкости и пузырьков газа. Показания расходомера не зависят от свойств контролируемой жидкости (вязкость, плотность) и характера потока (ламинарный, турбулентный).

При соответствующем подборе материала при применении анти-

коррозионных и других покрытий электромагнитные расходомеры можно применять для измерения расхода агрессивных жидкостей, а также жидкостей и паст с абразивными свойствами. Вследствие линейной зависимости, возникающей *э.д.с.* от расхода шкала вторичного прибора линейная.

Потребности в точных измерениях расхода воды диктуются возрастающими запросами современной экономики. Это связано в первую очередь с энергосбережением, так как расходомеры входят в состав теплосчетчиков и с учетом холодной воды и сточных вод. Любой расходомер имеет нормированные метрологические характеристики, которые определены во время испытаний по утверждению типа.

Характеристики приборов контролируются при первичной и периодической поверке в нормальных условиях поверочной лаборатории. Но при измерениях расхода реальных технологических сред возникают необъяснимые дисбалансы при учете энергоресурсов. Например, расход возвращаемой воды из теплосети больше объема подающейся туда воды, расход вырабатываемого насыщенного пара больше потребляемого количества пара, расход газа больше расчетного по КПД энергоустановки и т. д.

Обычно дополнительные погрешности, указываемые в технической документации, это погрешности от изменения таких величин, как температура окружающей среды и напряжения сетевого питания. Но что касается расходомеров, то их показания в большей степени зависят от характеристик измеряемой среды, а также от реальных условий монтажа и эксплуатации приборов. К сожалению, такие исследования, а также изучение влияния установки (монтажа) расходомеров в трубопроводе на результат измерения не проводятся. Внешними факторами, воздействующими на счетчики и расходомеры воды, в основном являются низкая скорость, несформированность и пульсации потока, шероховатость трубопровода, температура и многофазность среды (наличие воздуха в воде, наличие воды в паре), содержание механических примесей, физические параметры обратного потока, вибрации трубопроводов.

Испытания и поверка расходомеров и счетчиков осуществляются на эталонных установках, воспроизводящих расход среды, приближенный к идеальным условиям. Но в реальных условиях на расходомер воздействуют многие неучитываемые факторы, и они оказывают заметное влияние и на измеряемую величину, и на используемые средства измерения, поэтому результаты измерения в значительной степени искажаются. Ниже перечислены основные факторы воздействия.

1. Несформированность потока оказывает влияние на все типы расходомеров, основанных на принципе измерения «площадь – скорость». Распространенная рекомендация по установке расходомеров на расстоянии, равном 5…10 диаметрам трубопровода установки ($Д_у$) на входе и 2…5 $Д_у$ на выходе, предполагает, что расходомер должен работать так, как это задано производителем, т. е. в условиях идеального турбулентного потока. На практике поток может быть смещен, сдвинут по фазе аксиальных профилей скоростей, может быть завихренным или закрученным. Влияние местных сопротивлений, установленных перед расходомером, достаточно изучено только для расходомеров переменного перепада давления. Для всех остальных расходомеров таких исследований не проводится. Различные конфигурации трубопроводов создают различные виды возмущений потока, которые меняются по направлению и величине в зависимости от типа и силы вихревого движения, числа Рейнольдса и конкретного вида и конструкции расходомера. Требуемая длина прямых участков зависит от типа местных сопротивлений, влияние которых на расходомер должно быть оценено экспериментально, а для повышения точности измерения должно быть исключено.

2. Большинство расходомеров плохо работают на низких скоростях потока. Например, электромагнитные расходомеры сохраняют свои точностные характеристики при скоростях потока не ниже 0,2 м/с. На практике, ввиду чаще всего напоров малой силы, в системах теплоснабжения у потребителей фактическая скорость потока воды колеблется в пределах 0,1…0,5 м/с. Чтобы увеличить скорость, для электромагнитных расходомеров используют сужение потока, если нет ограничений по потерям давления. Есть ограничения по скорости потока и для вихревых расходомеров. При малых числах Рейнольдса ($Re < 5000$) нет устойчивого сигнала, так как сам процесс вихреобразования в нижней части диапазона является неустойчивым. Стабильные измерения выполняются только при условии $Re = 20000$. Но при увеличении скорости потока значение полезного сигнала ограничивается явлением кавитации. Кроме того, вихревые расходомеры чувствительны к вибропомехам, которые могут возникать при вибрациях трубопровода, в результате чего доля полезного сигнала уменьшается.

3. В процессе эксплуатации внутренняя поверхность трубопровода покрывается отложениями, которые зависят от скорости потока и химического состава воды. Неравномерная шероховатость трубопровода и коррозия влияют на точность измерения всех скоростных расходомеров, особенно работающих на малых диаметрах трубопроводов.

Например, для трубопроводов диаметром 50 мм отложения на внутренней стенке толщиной 2 мм вызовут сужение площади сечения на 16 %, что приведет к соответствующему увеличению скорости потока при неизменном расходе. Отложения на теле обтекания вихревых расходомеров изменяют его геометрические размеры, а значит, появляется дополнительная погрешность измерения. Если отложения обладают магнитными свойствами, они существенным образом увеличивают погрешность измерения электромагнитных расходомеров. Кроме того, твердые включения в потоке воды могут нарушить изоляционное покрытие (микротрещины) внутренней поверхности электромагнитных расходомеров, в этом случае шунтируется полезный сигнал. Отложения на стенках трубопровода влияют на скорость прохождения луча в ультразвуковых расходомерах для разных ультразвуковых методов измерения расхода и могут вызывать завышение показаний. В настоящее время нет доступных средств диагностики, которые могли бы надежно оценить состояние внутренней поверхности трубопровода. В лучшем случае можно измерить толщину стенки трубопровода с помощью ультразвукового толщиномера. Для введения коррекции необходимо определять толщину отложений и вводить поправку при измерении расхода. Но размер отложений на стенках трубопровода может быть неоднородным. Имеет смысл в процессе эксплуатации проводить чистку стенок трубопровода, а для этого предусмотреть возможность демонтажа измерительного участка или примыкающей к нему части трубопровода. Поэтому для малых и средних диаметров целесообразно применять измерительные участки трубопроводов из нержавеющей стали или участки со специальным внутренним покрытием, исключающим появление отложений. При использовании новых измерительных участков влияние отложений может проявиться только через несколько лет.

4. При измерении пульсирующего потока возникают динамические погрешности, которые определяются частотными характеристиками как прибора, так и самого потока. Для оценки динамических свойств расходомеров необходима специальная расходомерная установка, которая позволит воспроизвести пульсирующие потоки и оценить частотные характеристики расходомеров. Для устранения пульсаций необходимо устанавливать демпфирующие устройства.

5. Дополнительная погрешность измерения расхода появляется и от двухфазности среды – наличия воздуха в воде в виде микропузырьков. В водяных сетях всегда содержится некоторое количество воздуха, который попадает туда из источников вместе с водой или засасывается

из-за негерметичности во входной линии и в насосе. Принято считать, что в водопроводной воде содержится около 2,5 % нерастворенного воздуха при атмосферном давлении и температуре 10…15 °С. Однако в системах теплоснабжения содержание воздуха достигает 5…10 %, а в системе холодного водоснабжения – 20 %. Фактический объем воздуха в воде неизвестен, иногда вода бывает молочного цвета. Это обусловлено наличием микропузырьков нерастворенного воздуха, которые трудно удалить даже в специально предназначенных для этого деаэраторах. В тепловую сеть подается деаэрированная вода с содержанием воздуха 10…20 мкг/л, но часто возвращается с содержанием воздуха в тысячу раз больше из-за нарушения технологий ремонтных работ. После проведения ремонта по регламенту следует сначала опустошенную систему заполнить водой, вытесняя воздух через воздушные краны, и только после этого включать ее в общую сеть. Если из системы не вытеснен воздух, то эта завоздушенная вода на источнике вторичной деаэрации не подвергается и циркулирует до тех пор, пока не скоррозирует с металлом труб или постепенно не сольется в краны потребителей.

Известно, что все типы расходомеров при работе на газожидкостных смесях дают большую погрешность. Это один из способов возможного мошенничества на автозаправках: если на входе топливных насосов установить дистанционно управляемый электромагнитный клапан, соединенный с атмосферой, то бензин аэрируется, а счетчик будет считать и бензин, и воздух. К завоздушенной среде особенно чувствительны турбинные расходомеры, которые завышают расход при наличии воздуха в воде до 20 %. Существенно аэрация воды сказывается и на показаниях ультразвуковых расходомеров. Столкновения ультразвукового луча с пузырьком воздуха ведут к рассеиванию луча и ухудшению метрологических характеристик. Скорость звука в смеси «воздух – вода» находится в пределах 340…1530 м/с. После исследования расходомера на проливных установках с искусственным подмесом воздуха в измерительный трубопровод можно будет определить эту поправку и ввести в алгоритм вычислений. Например, установить два ультразвуковых датчика, врезанных перпендикулярно оси трубопровода, для измерения скорости звука в смеси. Казалось бы, можно решить проблему, используя расходомеры, измеряющие массу. Но, оказывается, наличие пузырьков воздуха в среде влияет и на показания кориолисовых расходомеров, так как амплитуда колебания труб уменьшается с увеличением процента аэрации. При возрастании расходов аэрированной жидкости погрешность измерения увеличивается и может достигать 200 % при основной погрешности 0,2 %.

### 2.6.6. Расходомер – счетчик электромагнитный РСМ–05–03

Принцип действия расходомера основан на явлении электромагнитной индукции. В состав расходомера входят ППМ (преобразователь промежуточный микропроцессорный), ППР (первичный преобразователь расхода) и ТС (термопреобразователь сопротивления). При движении электропроводной жидкости в магнитном поле, создаваемом электромагнитной системой ППР, между электродами возникает *э.д.с.* (в вольтах):

$$E = v_{ср}\, D\, B, \qquad (2.40)$$

где $B$ – индукция магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой ППР, Тл;

$v_{ср}$ – средняя скорость потока жидкости, м/с;

$D$ – расстояние между электродами, м.

Для данного типоразмера расходомера $B$ и $D$ являются постоянными величинами, поэтому *э.д.с.* Е зависит только от средней скорости потока жидкости. Наводимая *э.д.с.* передаётся в ППМ, где вычисляется объёмный расход жидкости.

ППМ функционально состоит из блоков аналоговой и цифровой обработки сигнала и блока питания.

ППР представляет собой отрезок трубопровода из немагнитного материала (рис. 2.24), внутренняя поверхность которого футерована диэлектриком (фторопластом). В диаметрально противоположных стенках трубопровода установлены два электрода, контактирующие с измеряемой средой и предназначенные для съёма *э.д.с.* индукции ($E$).

Благодаря такой конструкции ППР расходомер вносит минимальное гидравлическое сопротивление в поток жидкости. Магнитная система ППР состоит из двух последовательно включённых катушек возбуждения и магнитопровода. *Э.д.с.* индукции усиливается в блоке аналоговой обработки ППМ, преобразуется в цифровую форму и поступает затем в блок цифровой обработки сигнала. Блок аналоговой обработки сигнала также формирует ток, поступающий на катушки возбуждения магнитной системы ППР.

Измерение температуры жидкости ($t$) осуществляется путём измерения падения напряжения на ТС ($u$) при протекании через него тока, задаваемого источником тока ППМ. Измеренное напряжение поступает в блок аналоговой обработки ППМ и далее после преобразования его в цифровую форму также поступает в блок цифровой обработки сигнала.

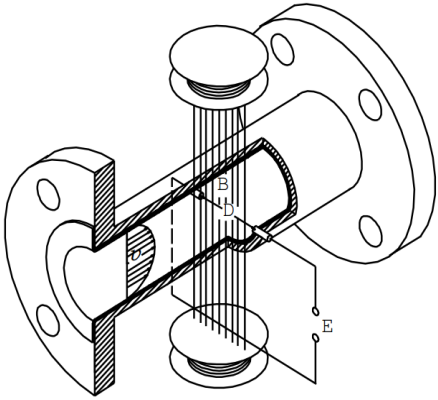



Рис. 2.24. Принцип действия и устройство ППР

Измеренные и преобразованные значения выводятся на устройство индикации. Значения объёмного расхода или температуры жидкости также передаются и в блок аналоговой обработки сигнала, где осуществляется преобразование одного из этих параметров в унифицированный сигнал постоянного тока. Преобразование объёмного расхода и объёма жидкости в импульсный сигнал, а также формирование посылок последовательных интерфейсов RS-232C и RS-485 осуществляется в блоке цифровой обработки сигнала.

Для выбора типоразмера расходомера необходимо знать диапазон расходов жидкости в трубопроводе, в котором будет устанавливаться ППР. Если диапазон расходов в данном трубопроводе укладывается в диапазон расходов нескольких типоразмеров ППР, то для обеспечения более устойчивой работы и повышения точности измерений следует выбирать расходомер с меньшим значением $Д_у$. Если значение $Д_у$ выбранного расходомера меньше внутреннего диаметра трубопровода, в который предполагается устанавливать ППР, то для монтажа в трубопровод используются переходные конуса (конфузор и диффузор) с углом конусности не более $15^o$.

При выборе ППР с меньшим $Д_у$ следует учитывать увеличение вносимого гидравлического сопротивления.

Источником опасности при монтаже и эксплуатации расходомеров являются:

– переменное напряжение сетевого питания;

– давление жидкости в трубопроводах до 1,6 МПа;

– температура жидкости(трубопровода) до 150 $^{o}$С.

Безопасность эксплуатации расходомеров обеспечивается:

– изоляцией электрических цепей составных частей расходомера;

– надёжным заземлением составных частей расходомера;

– прочностью корпуса ППР и защитных гильз ТС;

– герметичностью фланцевого соединения ППР с трубопроводом;

– перед проведением работ с помощью измерительного прибора необходимо убедиться в том, что на трубопроводе отсутствует опасное для жизни напряжение переменного или постоянного тока.

При эксплуатации расходомера необходимо соблюдать общие требования безопасности:

– не допускается эксплуатация расходомеров со снятыми крышками его составных частей;

– запрещается использовать расходомеры при давлении в трубопроводе, большем, чем рабочее давление ППР;

– запрещается демонтировать ППР до полного снятия давления в трубопроводе.

Перед включением расходомеров в электрическую сеть необходимо заземлить его составные части.

При обнаружении внешних повреждений прибора или сетевой проводки следует отключить расходомер до выяснения причин неисправности специалистом по ремонту.

В помещениях повышенной опасности рекомендуется использовать расходомеры с питанием от сети напряжением 36 В.

Запрещается установка и эксплуатация расходомеров в пожароопасных и взрывоопасных зонах всех классов.

При установке и монтаже расходомеров необходимо соблюдать требования ГОТ 12.3.003, ГОТ 12.3.032, ГОТ 12.3.036, а также Правил пожарной безопасности и техники безопасности.

При эксплуатации необходимо соблюдать «Правила устройства электроустановок», «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок» и «Общие правила пожарной безопасности Республики Беларусь для промышленных предприятий».

Для тушения пожара, при возгорании расходомера, разрешается использовать только углекислотные огнетушители типа ОУ-2, ОУ-5, ОУ-10 и др.

Расходомер требует периодического осмотра с целью контроля со-

блюдения условий эксплуатации, отсутствия внешних повреждений прибора и его составных частей, наличия напряжения питания. Периодичность осмотра зависит от условий эксплуатации, но не должна быть реже одного раза в месяц.

При проведении профилактических работ в системе с установленным расходомером и при возможности выпадения токопроводящего осадка на футеровке ППР необходимо демонтировать ППР и очистить отложения в его внутреннем канале чистой мягкой ветошью, смоченной в воде.

Очистка футеровки ППР должна производиться без повреждения поверхности электродов. Использование металлических и других предметов, могущих повредить поверхность электродов, для удаления осадка не допускается.

По мере необходимости рекомендуется очищать составные части расходомера при помощи сухой или смоченной в воде ветоши.

Несоблюдение условий эксплуатации расходомера может привести к отказу прибора или превышению допустимого уровня погрешности измерений. При появлении внешних повреждений необходимо вызвать сотрудника регионального представительства для определения возможности дальнейшей эксплуатации прибора.

## 2.7. Датчики влажности

Современные методы измерения влажности твердых тел, жидкостей и газов разделяются на прямые и косвенные. Прямые методы измерения влажности предполагают непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу, а затем их взвешивание и подсчет влажности.

Косвенные методы позволяют определить влажность по вспомогательным физическим величинам, имеющим тесную количественную связь с влажностью материала.

К косвенным методам относятся электрические методы и метод замера теплопроводности, зависящей от влагосодержания контролируемой среды.

Хотя косвенные методы менее точны, чем прямые, они получили широкое распространение, так как отличаются быстродействием и позволяют производить автоматический дистанционный контроль и регулирование влажности.

Датчики влажности по принципу действия разделяются на две большие группы в зависимости от измеряемой электрической характе-

ристики вещества: электрофизические и электропараметрические.

К группе электрофизических датчиков относятся: радиационные датчики, работа которых основана на измерении степени поглощения влагой инфракрасных излучений, электромагнитных колебаний высокой частоты, γ-лучей и нейтронных излучений; магнитоядерные резонансные, работающие на принципе поглощения радиочастотного магнитного поля ядрами атомов водорода влаги.

К электропараметрическим датчикам относятся: кондуктометрические, которыми определяют влажность по результатам измерения электрической проводимости; высокочастотные, при помощи которых определяют влажность по величине диэлектрической проницаемости или тангенса угла диэлектрических потерь, и гигрометрические, позволяющие оценить влажность среды по изменениям электрических или механических характеристик, вспомогательного гигроскопического вещества.

Кондуктометрические и высокочастотные датчики состоят из электродов, выполненных в виде цилиндрического или плоского воздушного конденсатора. Между обкладками конденсатора помещают материал, влажность которого необходимо измерить. Если при изменении влажности активная электропроводимость среды меняется больше, чем емкостная, то предпочтение отдается измерению активной проводимости.

На рис. 2.25 показана принципиальная схема полупроводникового электропсихрометра. В два плеча неравновесного моста включены два одинаковых полупроводниковых терморезистора, помещенных в гигроскопичные керамические трубки. Одна трубка смачивается водой, а вторая находится в воздухе. Таким образом, терморезистор $R_с$ находится в сухой трубке и его температура равна температуре воздуха. Сопротивление второго терморезистора $R_м$, трубка которого смачивается водой, зависит от испарения влаги и будет всегда выше, чем сопротивление сухого терморезистора, так как процесс испарения сопровождается понижением температуры.

Чем меньше влажность воздуха, тем интенсивнее происходит испарение воды с поверхности мокрой трубки и тем больше будет соотношение между $R_1$ и $R_с$ и, следовательно, в приборе *П* выходной сигнал по величине пропорционален влажности окружающей среды.

Для измерения влажности газов широко используются гигрометрические дилатометрические датчики, у которых линейные размеры воспринимающего элемента зависят от влажности. Воспринимающим элементом может быть человеческий обезжиренный волос или пленка

толщиной 5–30 микрон, изготовленная из оболочки кишок крупного рогатого скота. При изменении относительной влажности воздуха от 0 до 100 % происходит удлинение волоса на 2–2,5 %, а животной пленки – на 4–5 %.

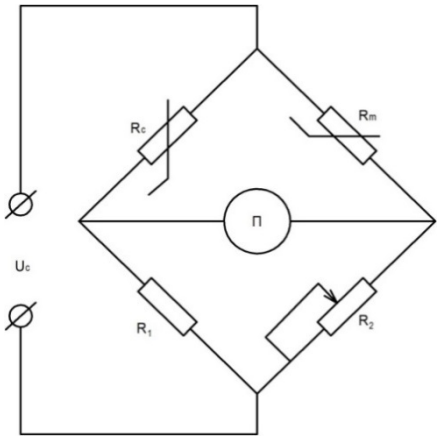



Рис. 2.25. Принципиальная схема электрического психрометра

Это удлинение передается через рычажный механизм указательной стрелке, отклонение которой, таким образом, будет пропорционально влажности.

В гигрометрических датчиках влажности газов используются полупроводниковые гигрорезисторы. Гигрорезисторы изготовляются в виде тонких пленок из полупроводниковых материалов, сопротивление которых резко падает при увеличении влажности. Недостатками гигрорезисторов являются большая инерционность, наличие гистерезиса и влияние температуры окружающей среды. Последний недостаток устраняется введением в схему элементов температурной компенсации.

# 3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

## 3.1. Измерение давления и разности давления

Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль (Па). Паскаль – это давление силы в 1 Н на площадь в 1 м$^2$ (Н/м$^2$). При при-

менении этой единицы могут использоваться приставки для преобразования кратных и дольных единиц, в первую очередь с целью сокращения числа значащих цифр в записываемом значении (например, 5,8 МПа, вместо 5800000 Па).

Измерения давления отечественными приборами производится в кгс/см$^2$ (килограмм-силы на сантиметр квадратный). При использовании для измерения давления жидкостных приборов с видимым мениском применяют в качестве единицы давления миллиметр водяного или ртутного столба. Кроме перечисленных единиц измерения, применяют физическую атмосферу, равную нормальному давлению атмосферного воздуха 760 мм рт. ст. при 0 °С и нормальном ускорении свободного падения (760 мм рт. ст. = 101, 325 кПа = 1,0332 кгс/см$^2$.

При измерении давления различают абсолютное, избыточное и вакуметрическое давление. Под термином абсолютное давление подразумевается полное давление $p$, под которым находится жидкость или газ. Оно равно сумме давлений избыточного $p_и$ и атмосферного $p_а$:

$$p = p_и + p_а. \qquad (3.1)$$

*Избыточное давление* равно разности между абсолютным давлением, большим атмосферного, и атмосферным давлением.

Под термином *вакуумметрическое давление* (разрежение или вакуум) $p_п$ понимается разность между атмосферным давлением и абсолютным давлением, меньшим атмосферного:

$$p_в = p_а - p. \qquad (3.2)$$

Устройства для измерения давления и разности (перепада) давлений получили общее название *манометры.* Их классифицируют следующим образом:

*барометры* – для измерения атмосферного (или барометрического) давления;

*манометры абсолютного давления* – для измерения абсолютного давления;

*манометры избыточного давления* – для измерения избыточного давления (в практике называют манометрами);

*вакуумметры* – для измерения вакуумметрического давления, т. е. давления ниже атмосферного (в практике применяют термин «разрежение»);

*напорометры и тягометры* – для измерения малых (до 40 кПа)

избыточного давления и вакуумметрического давления (разрежения) газовых сред;

*мановакуумметры* – для измерения избыточного и вакуумметрического давлений одновременно;

*тягонапорометры* – для измерения малых (до 40 кПа) давлений и разрежений газовых сред одновременно;

*дифференциальные манометры* (диафанометры) – для измерения разности (перепада) давлений;

*микроманометры* – для измерения очень малых давлений (ниже и выше барометрического) и незначительной разности давлений.

Чувствительные элементы всех манометров воспринимают два давления $p_1$ и $p_2$ и вырабатывают сигнал, пропорциональный их разности. У манометров избыточного давления, вакуумметров, тягометров и напорометров давление $p_2$ обычно равно атмосферному. Диафанометры также могут использоваться для измерения как избыточного, так и вакуумметрического давления, если один из двух штуцеров для подвода давления соединить с атмосферой.

По принципу действия манометры делят на две основные группы: жидкостные и деформационные (с упругими чувствительными элементами).

*Жидкостные манометры* (рис. 3.1) всех систем заполняются жидкостью таким образом, чтобы над жидкостью были образованы две полости, воспринимающие давления $p_1$ и $p_2$. В этих манометрах величина измеряемого давления определяется по высоте столба жидкости $h$ или по силе, образующейся за счет действия давления на поверхность сосудов. К приборам первой группы относятся U-образные (двухтрубные), чашечные (однотрубные) и поплавковые манометры, к приборам второй группы – колокольные.

U-образный (двухтрубный) манометр (рис. 3.1, *а*) состоит из одной прозрачной трубки, согнутой в виде латинской буквы U (или двух трубок, соединенных в нижней части). Трубки вертикально укреплены на основании, и по всей их высоте нанесена двухсторонняя шкала с нулем посередине. Трубки заливают жидкостью (обычно водой или ртутью, а иногда спиртом или трансформаторным маслом) до нулевой отметки. При применении U-образный манометр должен устанавливаться вертикально по отвесу. Отсчет производят по разности уровней жидкости $A$ в обеих трубках, что не всегда удобно.

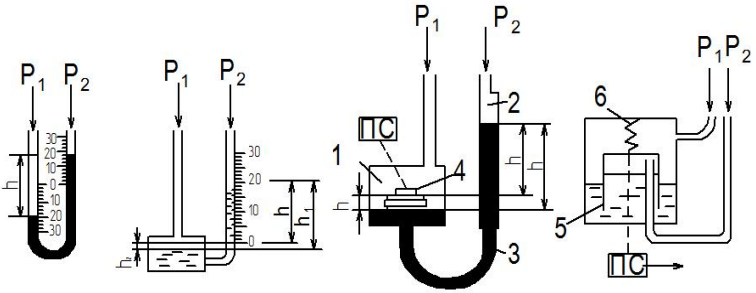



Рис. 3.1. Жидкостные манометры: *а* – U-образный (двухтрубный); *б* – чашечный (однотрубный); *в* – поплавковый; *г* – колокольный

Обычно с помощью U-образного манометра давление, разрежение или разность давлений измеряют в миллиметрах водяного или ртутного столба.

Если отсчет высоты столба жидкости $h$ по U – образному манометру производят невооруженным глазом, то при цене деления шкалы прибора в 1 мм при отсчете в двух коленах пределы допускаемой основной погрешности измерения давления, разрежения или разности давлений не превышают ±2 мм столба рабочей жидкости. Для увеличения точности отсчета высоты столба рабочей жидкости U-образные приборы снабжают зеркальной шкалой. В этом случае пределы допускаемой основной погрешности показаний не превышают ±1 мм столба рабочей жидкости. Отечественная промышленность выпускает двухтрубные манометры типа ДТ-5 и ДТ-6.

Чашечный (однотрубный) манометр (рис. 3.1, *б*) состоит из цилиндрического сосуда и сообщающейся с ним измерительной стеклянной трубки. При этом диаметр сосуда $D$ значительно больше диаметра трубки $d$ (обычно отношение $d^2/D^2 >$ 1/400). При измерении давления в объекте его соединяют с атмосферой. При изменении разрежения с объектом соединяют измерительную трубку, а с атмосферой – сосуд. При измерении разности (перепада) давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее – в измерительную трубку.

Когда под действием давления или разрежения жидкость в измерительной трубке поднимется на высоту $h_1$, а в широком сосуде опустится на высоту $h_2$, то высота столба $h$, соответствующая значению измеряемой величины, будет равна:

$$h = h_1 + h_2. \qquad (3.3)$$

Если $F_t$ – площадь сечения измерительной трубки, а $F_2$ – широкого сосуда, то

$$F_t\, h_1 = F_2\, h_2. \qquad (3.4)$$

Поскольку объем жидкости $F_t\ h$, в измерительной трубке равен объему $F_2 h_2$ жидкости, вытесненной из широкого сосуда, то, решив уравнения (3.3) и (3.4) относительно $h$, получим:

$$h = h_1(1 + F_t/F_2) = h_1(1 + d^2/D^2). \qquad (3.5)$$

Величиной $d^2/D^2 >$ 1/400, ввиду ее малости, на практике пренебрегают и отсчет ведут по столбу жидкости $h$, только в одной измерительной трубке, что упрощает измерение по сравнению с U-образным манометром. При цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба в измерительной трубке может быть произведен с погрешностью, не превышающей ±1 мм столба рабочей жидкости. Промышленностью нашей страны выпускаются однотрубные манометры типа ДТЖ и ММН-240.

Поплавковые манометры (рис. 3.1, *в*) работают по принципу рассмотренных выше чашечных манометров. В поплавковом манометре имеется два U-образных сосуда *1* и *2*, соединенных трубкой *3*. Большее давление подводится к широкому сосуду, в котором на поверхности рабочей жидкости (ртути или трансформаторного масла) находится поплавок *4*. Перемещение поплавка, зависящее от величины разности (перепада) давлений, передается стрелке отсчетного П или регистрирующего ПС устройства прибора. Поплавковые манометры сегодня уже не выпускаются, хотя в эксплуатации еще имеются.

В колокольных манометрах (рис. 3.1, *г*) чувствительным элементом является тонкостенный стальной колокол *5*, подвешенный на винтовой пружине *6*. Колокол свободно плавает в разделительной жидкости (трансформаторное масло), будучи частично погруженным в нее. Разделительная жидкость отделяет камеру большого давления («плюсовую») под колоколом от камеры меньшего давления («минусовой») над колоколом. Под действием разности давлений колокол и кинематически связанная с ним подвижная часть передающего преобразователя $П_р$ перемещаются до тех пор, пока усилие от приложенной к колоколу разности давлений не уравновесится упругими силами винтовой пружины. Перемещение подвижной части передающего преобразователя приводит к изменению выходного сигнала. В настоящее время выпускаются колокольные манометры типа ДКО.

Действие *деформационных манометров* основано на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов, воспринимающих измеряемое давление и преобразующих его в перемещение или усилие. Манометры этого типа широко применяют в диапазоне измерений от 50 Па (5 кгс/м$^2$) до 1000 МПа (10 000 кгс/м$^2$). Они выпускаются в виде тягомеров, напоромеров, манометров, вакуумметров. В качестве упругих чувствительных элементов в них используются трубчатые пружины, мембраны, сильфоны и вялые мембраны.

Одними из наиболее распространенных являются трубчато-пружинные манометры с одновитковой трубчатой пружиной (рис. 3.2, *а*). Трубчатая пружина (трубка Бурдона) представляет собой изогнутую трубку, имеющую эллиптическое или плоскоовальное поперечное сечение.

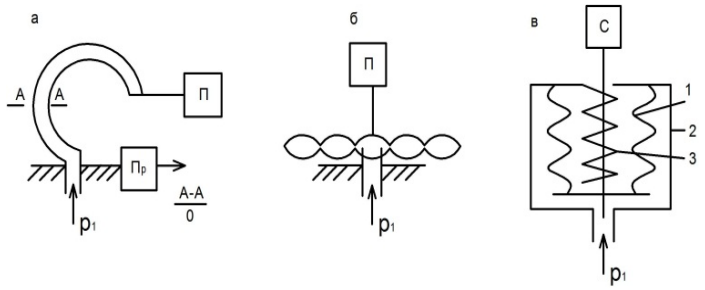



Рис. 3.2. Манометры с упругими чувствительными элементами (деформационные): *а* – трубчато-пружинный; *б* – мембранный; *в* – сильфонный

Трубка Бурдона представляет собой первичный преобразователь давления и является основным конструктивным элементом современного манометра, его чувствительным элементом.

Один конец трубчатой пружины, сообщающийся с измеряемой средой, закрепляют неподвижно, а другой – свободный, закрытый пробкой и запаянный – соединяют с механизмом показаний прибора, передающим преобразователем или другим устройством.

Под действием внутреннего давления пружина стремится уменьшить свою кривизну, вследствие чего ее свободный (запаянный) конец перемещается. Это перемещение передается на отсчетное или регистрирующее устройство манометра, либо воспринимается передающим преобразователем (на рис. 3.2 изображен показывающий при-

бор П, имеющий передающий преобразователь Пр).

Наиболее востребованными среди потребителей на территории Республики Беларусь, являются манометры, оснащенные трубкой Бурдона (и мановакуумметры) с осевым (тыловым), радиальным подключением и с креплением переднего кольца, диаметром корпуса 50, 63, 80, 100, 160 мм, диапазоном рабочего давления от – 1 до 2000 бар (рис. 3.3).

Некоторые модификации манометров снабжаются контактным устройством, срабатывающим при достижении измеряемой величиной заданного значения. Такие приборы называются электроконтактными манометрами. Промышленностью выпускаются трубчато-пружинные манометры типа ОБМ, МТП, ЭКМ.

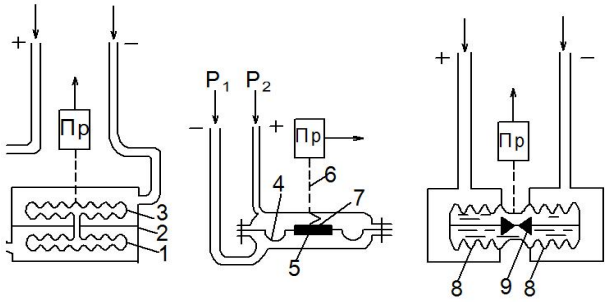
*а* *б* *в*

Рис. 3.3. Манометры: *а* – с осевым (тыловым) подключением; *б* – с радиальным подключением; *в* – с креплением переднего кольца

В мембранных манометрах упругий чувствительный элемент выполняется в виде мембранной коробки (рис. 3.4, *б*), состоящей из двух спаянных по периметру дисковых металлических гофрированных мембран. Внутренняя полость коробки сообщается со средой с большим давлением.

Под воздействием разности атмосферного и измеряемого давлений мембранная коробка сжимается или разжимается, что передается стрелке отсчетного устройства манометра П. В сильфонных манометрах (рис. 3.4, *в*) упругий чувствительный элемент выполнен в виде сильфона *7*, представляющего собой гофрированную тонкостенную металлическую трубку, открытую с одной стороны. Сильфон помещается в камеру *2*, в которую подводится измеряемое давление.

Изменение величины этого давления вызывает упругую деформацию сильфона и находящейся в нем винтовой пружины *3*. Перемещение дна сильфона передается регистрирующему устройству прибора Пр. Сильфонные манометры в настоящее время уже не выпускаются, хотя в эксплуатации они ещё встречаются (типа МСС).




*а* *б* *в*

Рис. 3.4. Дифференциальные манометры с упругими чувствительными элементами (деформационные): *а* – мембранный; *б* – с вялой мембраной; *в* – сильфонный

У мембранного диафанометра (типа ДМ) упругим чувствительным элементом является мембранный блок (рис. 3.5, *а*), состоящий из двух заполненных дистиллированной водой мембранных коробок *1* и *3*, закрепленных с обеих сторон в основании *2*. Основание с верхней и нижней крышками корпуса образуют две камеры: нижнюю – плюсовую и верхнюю – минусовую. Внутренние полости мембранных коробок сообщаются через отверстие в перегородке. Большее давление подводится к нижней камере, а меньшее – к верхней. Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается, вытесняя находящуюся в ней воду в верхнюю коробку *2*. Последняя расширяется, что воспринимается передающим преобразователем Пр.

Устройство диафанометра мембранного типа ДМЭ (или ДМЭР) состоит из измерительный блока диафанометра с чувствительным элементом, состоящим из двух мембранных коробок *1* и *3* выполненных аналогично измерительному блоку диафанометра ДМ (рис. 3.5, *б*).

С центром верхней мембранной коробки *3* с помощью немагнитного штока жестко связан магнитный плунжер *10*. Он может перемещаться внутри разделительной трубки *7* из немагнитной нержавеющей стали. На разделительной трубке *7* установлен передающий преобра-

зователь с магнитной компенсацией Преобразователь снабжен корректором нуля. Рядом с преобразователем расположен полупроводниковый усилитель *4*. В диафанометрах ДМЭ применяют усилитель, а в диафанометрах-расходомерах ДМЭР – усилитель. У диафанометров ДМЭР выходной сигнал постоянного тока пропорционален расходу, а у диафанометров перепаду давления.

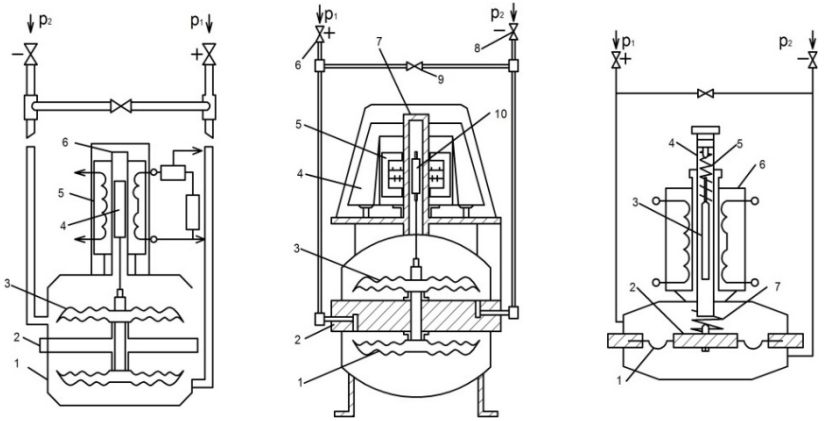



Рис. 3.5. Конструкция дифманометров мембранных: *а*) тип ДМ; *1, 3* – мембранные коробки; *2* – основание; *4* – сердечник; *5* – дифференциально-трансформаторноый преобразователь; *6* – немагнигая разделительная трубка; *б*) тип ДМЭ (или ДМЭР): *1, 3* – мембранные коробки; *2* – основание; *4* – полупроводниковый усилитель; *5* – передающий преобразователь с магнитной компенсацией; *6, 8* – запорные вентили; *9* – регулирующий вентиль; *10* – магнитный плунжер; *в*) тип ДМИ: *1* – вялая (неметаллическая) мембрана; *2* – жесткий центр; *3* – сердечник; *4* – разделительная трубка; *5* – винтовая цилиндрическая пружина; *6* – дифференциально-трансформаторный преобразователь; *7* – дополнительная пружина

Подвод давлений в камеры диафанометра осуществляется через две трубки и каналы в перегородке *2*. На трубках установлены два запорных (*6* и *8*) и один уравнительный вентиль *9*. Устройство диафанометра мембранного типа ДМЭ (или ДМЭР) состоит из измерительного блока диафанометра с чувствительным элементом, состоящим из двух мембранных коробок *1* и *3*, выполненных аналогично измерительному блоку диафанометра ДМ (рис. 3.5, *б*). С центром верхней мембранной коробки *3* с помощью немагнитного штока жестко связан магнитный плунжер *10*. Он может перемещаться внутри разделительной трубки *7* из немагнитной нержавеющей стали. На разделительной трубке *7*

установлен передающий преобразователь с магнитной компенсацией Преобразователь снабжен корректором нуля. Рядом с преобразователем расположен полупроводниковый усилитель *4*. В диафанометрах ДМЭ применяют усилитель, а в диафанометрах-расходомерах ДМЭР – усилитель. У диафанометров ДМЭР выходной сигнал постоянного тока пропорционален расходу, а у диафанометров перепаду давления. Подвод давлений в камеры диафанометра осуществляется через две трубки и каналы в перегородке *2*. На трубках установлены два запорных (*6* и *8*) и один уравнительный вентиль *9*.

На рис. 3.5, приведена упрощенная схема устройства диафанометра типа ДМИ. Чувствительным элементом прибора является вялая (неметаллическая) мембрана *1* с жестким центром *2*, работающая совместно с винтовой Цилиндрической пружиной *5*. Мембрана, укрепленная между двумя крышками корпуса прибора, образует две камеры, в которые подводятся давления. Снаружи разделительной трубки *4*, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали, находится дифференциально-трансформаторный преобразователь *6*. Для обеспечения устойчивости нуля прибора между жестким центром мембраны и корпусом установлена дополнительная пружина *7*, создающая предварительное натяжение основной измерительной пружины *5*.

Под действием разности давлений жесткий центр мембраны и связанный с ним полый сердечник *3* дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещаются до тех пор, пока сила, вызываемая разностью давлений, не уравновесится силой упругости винтовой пружины. Перемещение сердечника изменяет взаимную индуктивность между обмотками преобразователя, а вместе с тем и напряжение (э.д.с.) на выходе прибора. Выходной сигнал дифманометра пропорционален измеряемой разности давлений.

## 3.2. Измерение расхода и количества вещества

Расход вещества определяется его количеством, проходящим в единицу времени через данное сечение канала (например, трубопровода). Различают массовый расход $Q_м$ и объемный расход, обозначаемый через $Q_о$.

*Массовый расход* определяют как массу вещества, проходящего через поперечное сечение потока в единицу времени. В системе СИ единицей массового расхода является килограмм в секунду (кг/с).

*Объемный расход* определяют как объемное количество вещества в $м^3$, проходящее через сечение потока в единицу времени. В системе СИ единицей объемного расхода является кубический метр в секунду ($м^3$/с).

Внесистемными единицами, широко распространенными на прак-

тике, для массового расхода служат килограмм в час (кг/ч) и тонна в час (т/ч), а для объемного – кубический метр в минуту ($м^3$/мин), кубический метр в час ($м^3$/ч), литр в секунду (л/с), литр в минуту (л/мин) и литр в час (л/ч).

Соотношения между единицами расхода следующие:

– массовый – 1 кг/с = $3{,}6 \cdot 10^3$ кг/ч = 3,6 т/ч;

– объемный – 1 $м^3$/с = 60 $м^3$/мин = $3{,}60 \cdot 10^3$ $м^3$/ч = $10^3$ л/с = = $3{,}60 \cdot 10^6$ л/ч.

Для получения сравнимых результатов измерений объемный расход газа приводят к нормальным условиям, которыми при промышленных измерениях считаются: температура – $T_{ном}$ = 293,15 *К* (или $t_{ном}$ = 20 °С); давление – $p_{ном}$ = 101 325 Па (1,0332 кгс/$см^2$); относительная влажность – *W* = 0 %.

Устройство для измерения количества вещества, протекающего через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени (смену, сутки и т. д.), называют *счетчиком количества.* При этом количество вещества определяется как разность двух показаний счетчика в начале и в конце этого промежутка. Показания счетчика выражаются в единицах объема, а иногда в единицах массы.

Устройство для измерения расхода, т. е. количества вещества, протекающего через данное сечение трубопровода в единицу времени – час (ч), называют *расходомером,* а для измерения расхода и количества вещества одновременно – *расходомером со счетчиком.* Счетчики (интегрирующие устройства) могут быть встроены практически во все приборы, измеряющие расход.

Для измерения расхода и количества жидкостей и воздуха применяются расходомеры, которые можно разделить на следующие группы: переменного перепада давления в сужающем устройстве; постоянного перепада давления (обтекания); электромагнитные и переменного уровня. При напорном движении измеряемой среды, когда поток со всех сторон ограничен жесткими стенками, применяют первые две группы расходомеров.

Работа *расходомеров переменного перепада давления* основана на зависимости перепада давления, создаваемого установленным в трубопроводе неподвижным сужающим устройством, от расхода вещества. Принцип измерения по методу переменного перепада давления основан на известном в физике принципе неразрывности установившегося движения жидкости и уравнении Бернулли для жидкости:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = \text{const}, \qquad (3.6)$$

где $\frac{\alpha V^2}{2g}$ – удельная кинетическая (скоростная) энергия жидкости;

$z + \frac{p}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия (давление) жидкости.

Согласно принципу неразрывности, поток протекающего в трубопроводе вещества во всех сечениях одинаков, следовательно, в один и тот же момент времени протекают одинаковые количества этого вещества. Если на каком-то участке сечение сужается, то в этом месте скорость потока должна возрасти.

Согласно уравнению Бернулли, устанавливается постоянство суммы удельных кинетической (скорость) и потенциальной (давление) энергии в любом сечении потока. Следовательно, увеличение скорости вызывает уменьшение статического давления.

Сужающее устройство выполняет функции первичного преобразователя и создает в трубопроводе местное сужение, вследствие чего при протекании через него вещества скорость в суженном сечении повышается по сравнению со скоростью потока до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии, вызывает уменьшение потенциальной энергии потока в суженном сечении. Соответственно, статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства.

Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$ (рис. 3.6, *а*), зависящий от скорости потока и, значит, от расхода среды. Следовательно, перепад давления, создаваемый сужающим устройством, может служить мерой расхода вещества, а численное значение этого расхода может быть определено по перепаду давления $\Delta p$, измеренному диафанометром. В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара применяют стандартные и нестандартные устройства.

К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся *диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури.*

Диафрагма (рис. 3.6, *а*) представляет собой тонкий плоский диск *1* с круглым отверстием, центр которого лежит на оси трубы.

Отверстие имеет цилиндрическую и конусную части. Диафрагма всегда устанавливается цилиндрической частью (острой кромкой) против потока измеряемой среды. Сужение потока начинается до диафрагмы, и на некотором расстоянии за ней поток достигает минимального сечения.

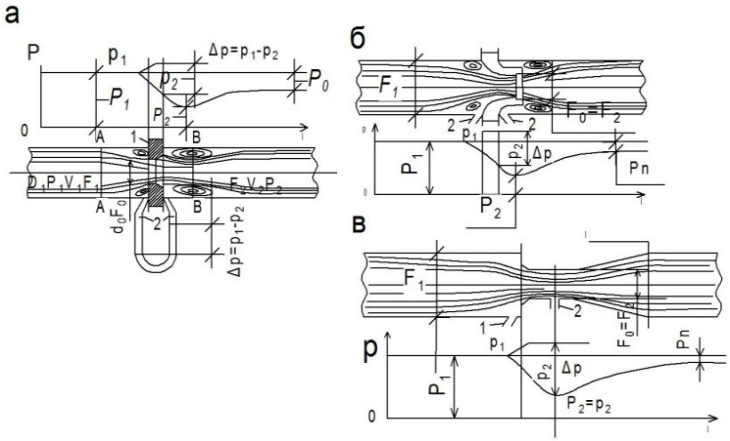



Рис. 3.6. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводах диафрагмы (*а*), сопла (*б*) и сопла Вентури (*в*)

Затем поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Кривая, характеризующая распределение давлений вдоль стенки трубопровода, представлена сплошной линией (см. рис. 3.6, *а*), а кривая распределения давлений по оси трубопровода – штрихпунктирной линией. Как видно, давление за диафрагмой полностью не восстанавливается.

При протекании вещества через диафрагму за ней в углах образуется «мертвая зона», в которой вследствие разности давлений возникает обратное движение жидкости, называемое вторичным потоком. Двигаясь в противоположных направлениях, струйки основного и вторичного потоков вследствие вязкости среды свертываются в виде вихрей. На вихреобразование за диафрагмой затрачивается значительная часть энергии, а следовательно, имеет место и значительная потеря давления. Измерение направления струек перед диафрагмой и сжатие струи после нее оказывают незначительное влияние на величину давления. Отбор давлений $p_x$ и $p_2$ производится через расположенные непосредственно до и после диска диафрагмы два отдельных отверстия *2* (или специальные камеры), к которым подключаются импульсные соединительные линии, идущие к измерительному прибору.

Сопло (рис. 3.6, *б*) представляет собой насадку с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе

и развитую цилиндрическую часть на выходе. Профиль сопла обеспечивает достаточно полное сжатие струи, поэтому площадь (сечение) цилиндрической части сопла может быть принята равной наименьшему сечению струи ($F_0 = F_2$). Вихреобразование за соплом вызывает меньшую потерю энергии, чем у диафрагмы. Отбор давлений $p_x$ и $p_2$ осуществляется так же, как и у диафрагмы.

Сопло Вентури (рис. 3.6, *в*) конструктивно состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок, и из расширяющейся конической части – диффузора. При такой форме сужающего устройства в основном благодаря наличию выходного диффузора потеря давления значительно меньше, чем у диафрагмы и сопла. Отбор давлений $p_1$ и $p_2$ осуществляется с помощью двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью сопла Вентури группой равномерно расположенных по окружности отверстий. Труба Вентури отличается от сопла Вентури тем, что входной цилиндрический участок переходит во входной конус, затем идут короткий участок (горловина) и диффузор.

Принцип измерения расхода вещества по перепаду давления, создаваемому сужающим устройством, и основные уравнения одинаковы для всех типов сужающих устройств, различны лишь некоторые коэффициенты в этих уравнениях, определяемые экспериментальным путем.

Для измерения расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве применяются *дифференциальные манометры* (диафанометры), принцип действия которых рассмотрен ранее. По способу выдачи измерительной информации диафанометры подразделяют на показывающие и самопишущие.

Для измерения расхода загрязненных жидкостей (в частности, природных и сточных вод) применяются электромагнитные и щелевые расходомеры. Принцип действия *электромагнитных расходомеров* основан на законе электромагнитной индукции, по которому проведенная в проводнике электродвижущая сила пропорциональна скорости его движения в магнитном поле. Таким движущимся в магнитном поле проводником является электропроводная жидкость, протекающая через первичный электромагнитный преобразователь расхода, установленный в трубопроводе. Измеряя *э.д.с.,* наведенную в электропроводной жидкости, которая при своем движении пересекает магнитное поле первичного преобразователя, можно определить среднюю скорость текущей жидкости, а вместе с ней и объемный расход. При круг-

лом сечении трубопровода величина этой ЭДС (в вольтах) находится по формуле:

$$E = vBd, \tag{3.7}$$

где $v$ – средняя скорость потока жидкости, м/с;

$B$ – индукция магнитного поля, Тл;

$d$ – внутренний диаметр трубопровода, м.

Магнитное поле электромагнитного расходомера типа ИР (рис. 3.7, *а*) внутри участка трубы *7*, выполненной из немагнитного материала и покрытой изнутри электроизоляционным слоем, создается электромагнитом *2*.

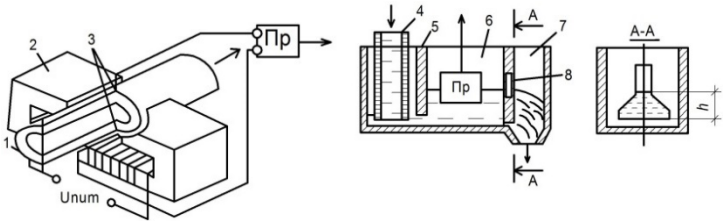



Рис. 3.7. Расходомеры жидкостей и пульп: *а* – электромагнитный; *б* – переменного уровня (щелевой)

В пересекающей магнитное поле жидкости наводится *э.д.с.* В одном поперечном сечении трубопровода диаметрально противоположно установлены два электрода *3*. Снимаемая с них разность потенциалов подается на вход промежуточного преобразователя Пр, где преобразуется в выходной сигнал, пропорциональный расходу. Электромагнитные расходомеры могут применяться на жидкостях с удельной электрической проводимостью не менее $10^{-3}$ См/м.

Отсутствие в измерительном канале каких-либо сужающих устройств и движущихся деталей позволяет измерять расходы как однородных жидкостей, так и суспензий и пульп, твердая фаза которых не содержит ферромагнитных частиц.

Принцип действия щелевых расходомеров переменного уровня со сливом типа ЩРП (рис. 3.7, *б*) основан на зависимости уровня жидкости над сливной стенкой *5* от ее объемного расхода $Q_0$.

Для прямоугольного слива с тонкой стенкой справедливо соотношение:

$$Q_{\text{о}} = mb\sqrt{2g}\,\text{Н}^{3/2}, \qquad (3.8)$$

где $m$ – коэффициент расхода, учитывающий потерю напора и эффект бокового сжатия струи;

$b$ – ширина сливной стенки, м;

$g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$;

Н – напор жидкости на пороге водослива, м.

Расходомер состоит из расходомерной емкости *6* и уровнемера Пр, являющегося измерительным преобразователем расхода. К емкости *6* суспензия подводится по патрубку *4,* а отводится в сливную коробку 7 через отверстие *8.* Для измерения высоты суспензии в таких расходомерах используются поплавковые, пьезометрические и электроконтактные уровнемеры.

Для измерения расходов воды в закрытых трубопроводах применяются расходомеры постоянного и переменного перепада, а также индукционные.

Принцип действия расходомеров постоянного перепада основан на восприятии динамического давления потока, действующего на чувствительный элемент.

Ротаметр с электрическим преобразователем показан на рис. 3.8. Он состоит из двух основных частей – ротаметрической и электрической, собранных в одном корпусе *1*. Основным элементом ротаметрической части является конический поплавок *2*, перемещающийся внутри кольцевой диафрагмы *3* в вертикальном направлении.

Электрическая часть состоит из индуктивных катушек *4* с плунжером *5*, жестко связанным с поплавком, и представляет собой дифференциально-трансформаторный преобразователь. Электрическая часть ротаметра снаружи защищена кожухом *6*. Ротаметры устанавливаются в вертикальном участке трубопровод.

Поток воды поступает в трубку снизу вверх и, увлекая за собой поплавок, перемещает его вверх. При этом увеличивается зазор между поплавком и стенкой кольцевой диафрагмы, в результате чего уменьшается скорость воды в зазоре и возрастает давление над поплавком. В равновесном состоянии при любом положении поплавка разность давлений, действующих на него с обеих сторон, остается постоянной и определяется силой, необходимой для его уравновешивания.

Перемещение поплавка передается плунжеру и преобразуется дифференциально-трансформаторным элементом в напряжении переменного тока, которое изменяется по величине к фазе функционально расходу.

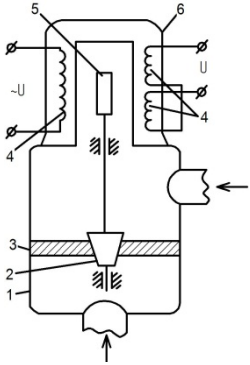



Рис. 3.8. Ротаметр с дифференциально-трансформаторным преобразователем:
*1* – корпус; *2* – конический поплавок; кольцевая диафрагма; *4* – катушка индуктивности; *5* – плунжер; *6* – кожух

Достоинствами ротаметров являются равномерность шкалы, большой диапазон измерения 10:1, малая и постоянная потеря давления, постоянство погрешности во всем диапазоне.

Ротаметры с электрическим выходом типа РЭ выпускаются промышленностью на диаметры условного прохода от 6 до 100 мм и расходы 25–1600 л/ч.

Промышленностью выпускается несколько модификаций индукционных расходомеров. Индукционные расходомеры типа ИР-51 изготовляются на диаметры условного прохода 10–300 мм и расходы от 0,32 до 2500 м$^3$/ч. Расходомеры типа ЧРИ применяются на трубопроводах с условными диаметрами 400, 600 и 800 мм и расходами до 5000 м$^3$/ч.

Измерительные блоки расходомеров имеют процентную шкалу и унифицированный выход по постоянному току. К нему может подключаться счетная приставка типа С-1 для определения суммарного количества измеряемой среды за любой промежуток времени.

Индукционные расходомеры 5РИ выпускаются с унифицированным пневматическим выходом. Пневмопреобразователь встраивается непосредственно во вторичный прибор. Эти приборы могут устанавливаться на насосных станциях, где имеются компрессорные установки.

Достоинства индукционных расходомеров: они не создают дополнительных сопротивлений протеканию жидкости, позволяют измерять

расход загрязненных жидкостей в широких пределах изменения расходов, обладают высокой точностью во всем измеряемом диапазоне (основная погрешность не превышает 1–1,5 %).

К недостаткам относится сравнительно большая масса преобразователя. Так, преобразователь на диаметр условного прохода 300 мм имеет массу около 300 кг.

Этого лишены индукционные расходомеры ИР-56 (рис. 3.9).

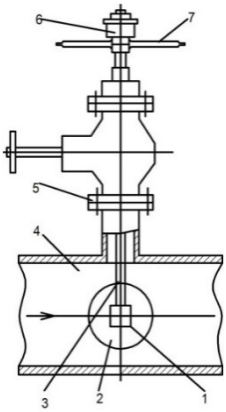



Рис. 3.9. Индукционный расходомер ИР-5Р: *1* – преобразователь; *2* – водяной поток; *3* – штанга; *4* – рабочий трубопровод; *5* – фланец; *6* – клеммная коробка; *7* – рукоятка

Их конструктивной особенностью является расположение преобразователя *1* в середине рабочего трубопровода *4*. Крепится преобразователь к трубопроводу с помощью фланца *5*. Преобразователь закреплен на стальной металлической штанге *3* и регулируется внутри трубопровода рукояткой *7*. Два электрода (на рисунке не показаны) располагаются на боковых поверхностях преобразователя. Исследуемый водяной поток, входящий в зону измерения, представляет собой сферу *5*, охватывающую преобразователь. Подключают его ко вторичному измерительному прибору с помощью клеммной коробки *6*.

Такая конструкция позволяет уменьшить габариты и массу преобразователя и, что особенно важно, измерять расход в трубопроводах большого диаметра (до 3,6 м).

При измерениях в открытых каналах расход зависит от скорости потока и его сечения. В общем случае методы и приборы измерения

расходов в открытых руслах предусматривают контроль указанных параметров и реализацию операции умножения «скорость на сечение». Но выполнение этого достаточно сложно в полевых условиях. Поэтому при измерениях чаще всего исключают один из контролируемых параметров, а расход определяют по значениям второго. Влияние неконтролируемого параметра учитывают методом тарирования или расчетным путем по известным аналитическим зависимостям. Различают измерения расходов на нерегулируемых участках русел и на регулируемых перегораживающих сооружениях, водосливах.

На нерегулируемых участках каналов в качестве контролируемого параметра принимают уровень воды, а на регулируемых – скорость водяного потока. На нерегулируемых участках измерения выполняются с использованием специальных водомерных сооружений и без них.

При отсутствии специальных водомерных сооружений используется метод тарирования. Он основан на использовании (установленной предварительными измерениями) зависимости расхода от уровня воды $Q = f(H)$. Метод применяется для открытых русел вне зоны подпорного действия перегораживающих сооружений и для нерегулируемых гидротехнических сооружений – быстротоков, перепадов, глухих перегораживающих сооружений и т. д.

Для повышения точности строятся специальные сооружения – водосливы, водомерные лотки и пороги, позволяющие снизить погрешность измерений до 2–3 %. Тип водомерного сооружения выбирается в зависимости от расхода: при расходах до 0,5 м$^3$/с применяются водосливы с тонкой стенкой трапецеидальной или треугольной формы и острым заложением откосов; при расходах до 7 м$^3$/с – водомерные лотки; до 30 м$^3$/см – водомерные пороги.

Водомерные сооружения не требуют экспериментальной тарировки, а зависимость $Q = f(H)$ определяется по аналитическим зависимостям, учитывающим геометрические размеры сооружения.

На регулируемых гидротехнических сооружениях для измерения расхода используются водомерные приставки и трубчатые водомеры с сужающими устройствами (ТВС). Принцип измерения основан на контроле скорости водяного потока при постоянном сечении и аналогичен измерениям в закрытых трубопроводах.

Водомерные приставки представляют собой трубы круглого или прямоугольного сечения длиной $L_{пр}$, в полтора – три раза превышающей диаметр или высоту трубы. Приставка устанавливается перед регулирующим щитом. Величина расхода (в м$^3$/ч) определяется по измеряемому перепаду давлений $z_{пр}$ между верхним бьефом и водомерным

сечением, удаленным от выхода на расстояние $l$ = 0,3–1,5 диаметра или высоты приставки:

$$Q = \mu_{пр}\omega_{пр}\sqrt{2gz_{пр}}, \quad (3.9)$$

где $\mu_{пр}$ – коэффициент расхода приставки;

$\omega_{пр}$ – площадь сечения;

$z_{пр}$ – перепад давлений;

$g$ – ускорение свободного падения.

Коэффициент расхода $\mu_{пр}$ зависит от конструкции и геометрических размеров приставки.

Водомерные приставки используют для измерений расходов до 20 м$^3$/с в диапазоне перепадов 1–6. Ошибка измерений не превышает ±5 %. Их достоинством является работа в широком диапазоне изменения перепадов от 2 до 60 см, нечувствительность к изменению режима нижнего бьефа.

Для измерений расходов до 2 л/с применяют трубчатые водомеры с сужающими устройствами (ТВС). Сужающие устройства выполняются в виде конусной насадки, кольца или сегментной диафрагмы.

Диапазон измерений уровня ТВС составляет 1–4, погрешность измерений не превышает ±5 %. Для измерения уровня используются самописцы и уровнемеры с преобразующими устройствами для дистанционной передачи. К недостаткам ТВС относится создание дополнительных сопротивлений водяному потоку.

На сооружениях, оборудованных автоматическими затворами-регуляторами, учет воды ведется на основании контроля положения затвора и выполнения операции умножения «сечение на время» с введением поправок на скорость потока. В этом случае не требуется специальных водомерных сооружений.

Большой интерес представляет внедрение в мелиорацию ультразвукового метода измерений, основанного на зависимости величины смещения ультразвуковых колебаний от скорости водяного потока. Достоинством этого метода является его бесконтактность, что не создает препятствий протеканию жидкости.

Для измерения количества вещества в коммунальном хозяйстве применяют тахометрические *счетчики количества*, состоящие из тахометрического преобразователя расхода и счетного суммирующего механизма.

*Тахиметрическим преобразователем расхода* называют первичный преобразователь, в котором скорость движения чувствительного элемента, взаимодействующего с потоком вещества, пропорциональна

объемному расходу. По принципу действия тахометрические счетчики разделяют на скоростные и объемные.

В *скоростных счетчиках* (типа УВК, ВК, МС) в качестве рабочего элемента применяют вертушки (крыльчатки, турбинки или другие тела) с вертикальной (рис. 3.10) или горизонтальной осью вращения. Под действием потока вещества вертушка *3* на опорном шипе *4* совершает непрерывное вращательное движение с угловой скоростью, пропорциональной скорости потока, а следовательно, и расходу.

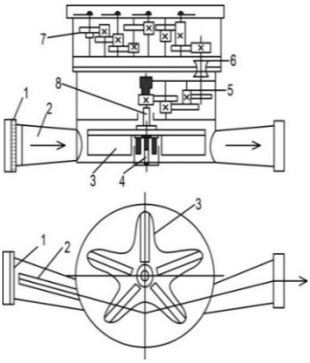



Рис. 3.10. Схема устройства счетчика количества вещества (скоростного с вертикальной осью вращения вертушки)

Число оборотов вращающегося элемента суммируется счетным механизмом *7*, с которым вертушка соединяется с помощью передаточного механизма (редуктора) *5*. Редуктор и счетный механизм соединены между собой осью с сальниковым уплотнением *6*. Счетный механизм отделен от проточной части прибора герметичной перегородкой, в которой установлен сальник передаточной оси *8*. На входном патрубке счетчика устанавливаются металлическая сетка *1* предохраняющая прибор от попадания в него посторонних тел, и струевыпрямитель *2*. В объемных счетчиках вещество измеряется отдельными равными по объему дозами. В поршневом счетчике (рис. 3.11, *а*) жидкость из трубы *1* через распределительный четырехходовой клапан *2* поступает под поршень *3* и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, вытесняет жидкость, находящуюся в верхней полости цилиндра, через распределительный клапан в трубу *4*. Когда поршень достигнет верхнего крайнего положения, четырехходовой кран, связанный специальным механизмом *5* со штоком поршня, перемещается в положе-

ние, показанное на рис. 3.11, *б* пунктиром. Вследствие этого жидкость из трубы *1* будет поступать в верхнюю полость цилиндра, поршень начинает перемещаться вниз и из нижней полости жидкость вытесняется через четырехходовой кран и трубу *4*. С момента достижения поршнем крайнего положения цикл повторяется.

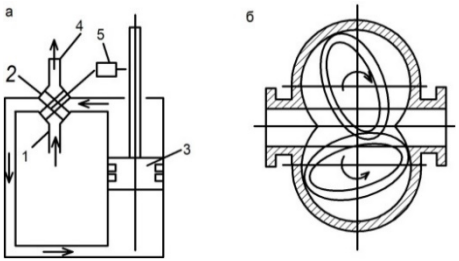



Рис. 3.11. Схема объемных счётчиков: *а* – поршневой счетчик; *б* – счетчик с овальными шестернями

Число доз за определенный промежуток времени суммируется счетным механизмом, связанным со штоком поршня с помощью передаточного механизма, а количество жидкости, равное сумме объемов протекших доз, показывается счетным указателем (на рис. 3.11 счетный механизм и указатель не показаны). В коммунальном хозяйстве применяются счетчики типа СМ для измерения объемного количества жидкостей. Для измерения объемного расхода и учета объемного количества газа используются счетчики типа «Тургас», состоящие из турбинного преобразователя (датчика) объемного расхода ПРГ и электронного блока измерения.

На рис. 3.11, *б* приведена схема объемного счетчика жидкости с овальными шестернями типа ШЖУ. В измерительной камере счетчика имеются две овальные шестерни, которые находятся друг с другом в зацеплении и при вращении под действием потока измеряемой жидкости непрерывно обкатывают друг друга. Измерение объемного количества жидкости происходит путем периодического перемещения определенных ее объемов, заключенных в полостях между цилиндрической поверхностью измерительной камеры и овальными поверхностями шестерен. Вращение шестерен через кинематическую цепь передается счетному механизму.

## 3.3. Измерение температуры

*Температура* (от лат. *temperatura* – нормальное состояние) – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы и являющаяся одним из основных параметров в инженерных системах. Она отличается рядом принципиальных особенностей, обусловивших необходимость применения разнообразных методов и технических средств для ее измерения.

Для измерения температуры были предложены различные температурные шкалы, а наибольшее распространение получила 100-градусная температурная шкала Цельсия. По этой шкале за основные (реперные) точки, ограничивающие основной температурный интервал, были приняты точка плавления льда (0 °С) и точка кипения воды (100 °С) при нормальном атмосферном давлении. Единица температуры, равная одной сотой части основного температурного интервала, получила название градус. По шкале Цельсия градус обозначается прибавлением к числовому значению температуры в градусах символов °С, например 94 °С. За рубежом наряду с условной температурной шкалой Цельсия используют шкалу Фаренгейта в градусах Фаренгейта – °F и шкалу Реомюра в градусах Реомюра – °R: 1 °С = 1,8 °F = 0,8 °R.

Температурные шкалы строятся на допущении о линейной зависимости между термометрическими (физическими) свойствами тела и температурой. В действительности нет ни одного такого свойства, которое в полной мере могло бы удовлетворить этим требованиям во всем интервале измеряемых температур.

Независимой от свойств термометрического вещества является термодинамическая температурная шкала, предложенная в середине XIX веке Кельвином. В этой шкале нижней границей основного температурного интервала служит точка абсолютного нуля (0 °К), а в качестве верхней границы принята «тройная точка воды», лежащая выше точки таяния льда на 0,1 °С. Этой точке было присвоено числовое значение 273,16 °К. Тройной точкой воды называется температура равновесия между тремя фазами воды: твердой (лед), жидкой (вода) и газообразной (пары воды).

Единицей термодинамической температуры является кельвин (К) вместо прежнего наименования – градус Кельвина (°К). Единица кельвин равна 1/273,16 части интервала от абсолютного нуля температуры до температуры тройной точки воды. Теоретическая термодинамическая шкала не получила широкого практического применения из-за больших трудностей ее реализации. Более удобной оказалась между-

народная практическая температурная шкала (МПТШ).

Согласно МПТШ и введенному в нашей стране ГОСТ 8.157-75 «Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы температурные практические», предусматривается применение двух температурных шкал: термодинамической температурной шкалы и практической температурной шкалы. Температура по этим шкалам выражается двояко: в Кельвинах (К) и в градусах Цельсия (°С). Градус Цельсия равен кельвину (1 К = 1 °С). Между температурой $T$ выраженной в Кельвинах, и температурой t выраженной в градусах Цельсия, установлено соотношение:

$$t = T - T_0, \tag{3.10}$$

где $T_0$ = 273,16 К (температура тройной точки воды 273,16 К соответствует, как указывалось выше, 0,01 °С, следовательно, 273,16 К – температурный промежуток, на который смещено начало отсчета). Наименование «градус Цельсия» дано в честь шведского астронома и физика А. Цельсия. Наименование «кельвин» дано в честь английского физика Уильяма Томсона-Кельвина.

Существуют контактные и бесконтактные методы измерения температуры. В первом случае необходимо обеспечить надежный тепловой контакт чувствительного элемента прибора с объектом измерения. При отсутствии возможности такого контакта применяют различные бесконтактные методы измерения.

Средство для контактного измерения температуры называется *термометром.* По принципу действия термометры разделены на три группы: *расширения, сопротивления* и *термоэлектрические.*

Действие термометров расширения основано на тепловом расширении (изменении объема) термометрического вещества (жидкостные, газовые) или линейных размеров твердых тел (дилатометрические, биметаллические) в зависимости от температуры. Пределы измерения этими термометрами составляют от –190 до +600 °С.

*Жидкостный стеклянный технический термометр* (рис. 3.12, *а*) имеет заполненный жидкостью (обычно ртутью) резервуар *1,* тонкостенную капиллярную трубку *2,* пластину *3* с нанесенной на ней шкалой, наружную стеклянную оболочку *4.* Такие термометры применяются для измерения температуры от –90 до +30 °С и от –60 до +200 °С. Их изготавливают прямыми (типа П и А) и угловыми – изогнутыми под углом 90 или 135° (типа У и Б). Нижняя часть выполняется различной длины (от 66 до 2000 мм). Для предохранения стеклянной обо-

лочки от повреждения термометры помещают в защитные стальные оправы *5*, которые, как и термометры, выполняют прямыми и угловыми. Для сигнализации и измерения температуры в лабораторных и производственных условиях применяют технические термометры – ртутные электроконтактные (типа ТПК или ТЭК).

Их изготавливают с электроконтактами, впаянными к капиллярную трубку термометра. Замыкание или размыкание электрической цепи между контактами происходит вследствие расширения или сжатия ртути при нагревании или охлаждении нижней части термометра.

Принцип действия манометрических термометров (типа ТДГ, ТПГ, ТДЖ, ТПЖ, ТКП и др.) основан на изменении давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме (рис. 3.12, *б*), состоящей из термобаллона *6*, погружаемого в среду, температура которой измеряется, гибкого соединительного капилляра *7* и манометрической трубчатой пружины *8*, один конец пружины впаян в держатель *9* канал которого соединяет внутреннюю полость пружины, герметизирован и шарнирно через тягу *10* зубчатый сектор *11* и шестерню *12* связан с показывающей стрелкой прибора *13*.

Термосистема термометра заполнена рабочим веществом: газом, жидкостью или смесью жидкости с ее насыщенным паром. При нагревании термобаллона увеличивается давление рабочего вещества в замкнутом объеме герметичной термосистемы, вследствие чего пружина *8* деформируется (раскручивается) и ее свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины передаточными механизмами *10, 11, 12* преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы Прибора, по которой производят отсчет температуры.

*Дилатометрические* и *биметаллические* термометры основаны на использовании свойств твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Действие биметаллического термометра основано на измерении разности линейных расширений при нагревании двух сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения разнородных металлов, обладающих различными коэффициентами линейного расширения. При нагревании биметаллического элемента он изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения и при заданной температуре замыкает контакты. Биметаллические температурные реле применяются для интервала температур от –60 до +300 °С.

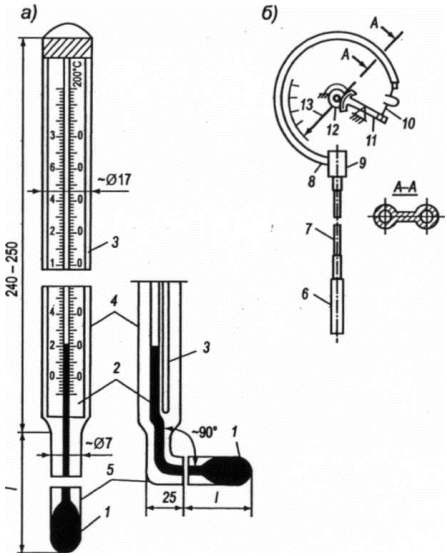



Рис. 3.12. Термометры: *а* – технический жидкостный стеклянный; *б* – показывающий манометрический

Дилатометрический термометр (типа ТУДЭ, РТ и др.) состоит из металлической трубки, внутри которой имеется связанный с донышком трубы стержень, причем материал стержня обладает меньшим коэффициентом линейного расширения, чем материал трубки. При измерении трубка должна быть полностью погружена в среду, температура которой измеряется. С повышением температуры среды трубка удлиняется больше, чем стержень, вследствие чего он перемещается вниз. Это перемещение стержня через систему рычагов преобразуется в перемещение стрелки относительно шкалы прибора. Пределы измерения таких термометров составляют от –150 до +700 °С.

Принцип действия термометра сопротивления (рис. 3.13) основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от температуры.

Чувствительным элементом термометра сопротивления является тонкая платиновая или медная проволока *1*, намотанная на каркас, заключенный в защитную арматуру *2*. Концы проволоки в колпачке *4* приварены к выводам, которые соединяются с кабелем для передачи показаний. Штуцер *3* служит для монтажа термометра.

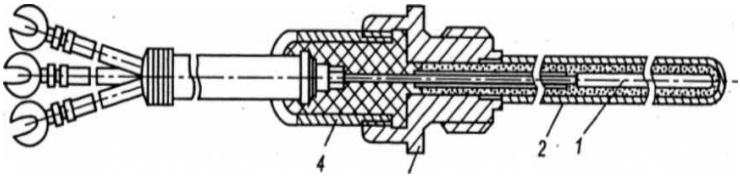



Рис. 3.13. Конструкция термометров сопротивления

Платиновые термометры сопротивления (ТСП) используются для измерений от –200 до +650 °С, медные термометры сопротивления (ТСМ) – для измерений от 50 до +180 °С. Наиболее благоприятные для надежной работы этих термометров верхние пределы измерения составляют: 600 °С для ТСП и 100 °С для ТСМ.

Термометры сопротивления, чувствительные элементы которых изготовлены из полупроводниковых материалов, называются *термисторами* или *терморезисторами.* Их применяют для измерения температуры от –90 до +180 °С.

Передача информации от термометров сопротивления осуществляется с помощью логометров и мостов, измеряющих изменение электрического сопротивления термометра при изменении температуры контролируемой среды. Логометры сегодня почти не применяются в связи с широким распространением автоматических электронных мостов, имеющих более высокий касс точности.

Принципиальная схема уравновешенного моста с включенным термометром сопротивления R изображена на рис. 3.14 ($R_1$ и $R_3$ – резисторы с постоянными известными сопротивлениями, $R_2$ – реохорд, который является регулируемым плечом моста).

Сопротивление двух соединительных линий 2 $R_л$ прибавляется к сопротивлению термометра $R$. К одной из диагоналей моста ($BD$) подключен внешний источник постоянного тока, к измерительной диагонали $AC$ – чувствительный измерительный прибор (нуль-прибор *НП*).

Изменяя значение сопротивления $R_2$ путем перемещения движка реохорда, всегда можно добиться такого состояния схемы, при котором при определенном соотношении между сопротивлениями плеч моста потенциалы точек *А* и С, а следовательно, и ток в нуль-приборе *НП*, равны нулю. Такое состояние обычно называют состоянием равновесия схемы.

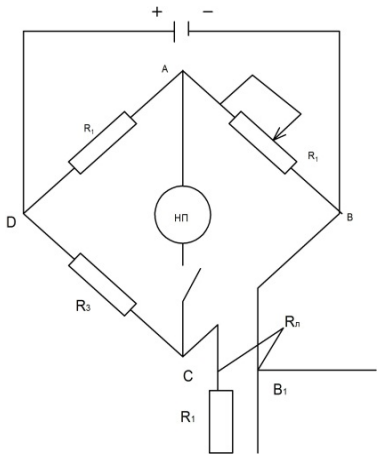



Рис. 3.14. Принципиальная схема уравновешенного моста с термометром сопротивления

При изменении сопротивления термометра R, нарушается равновесие моста. Поскольку мостовая схема приходит в равновесие при равенстве произведений сопротивлений противоположных плеч, то, перемещая движок реохорда $R_2$, можно найти положение равновесия схемы по отсутствию отклонения стрелки нуль-прибора. Таким образом, по положению движка реохорда можно определить значение измеряемого сопротивления термометра, а следовательно, и его температуру. Следует отметить, что величина сопротивления $2R_n$ в общем случае может изменяться, так как сопротивление приводам зависит от колебаний температуры окружающей среды. Если возникающие при этом погрешности измерения превышают допустимые пределы, то применяют так называемую техпроводную схему подключения термометра. При этом минус источника питания с помощью дополнительного третьего привода подключается непосредственно к термометру сопротивления R. Кроме того, сопротивления соединительных линий $R_n$ должны быть равны между собой. Для выполнения этого условия в цепь соединительных линий последовательно включают специальные уравнительные катушки с номинальным сопротивлением 2,5 Ом. Изменением сопротивлений этих катушек можно добиться равенства сопротивлений соединительных линий.

Способ измерения температуры *термоэлектрическими термомет-*

*рами* основан на существовании определенной зависимости между термо *э.д.с.*, устанавливающейся в цепи, состоящей из разнородных проводников, и температурами мест их соединений. В цепи (рис. 3.15, *а*), составленной из двух различных термоэлектрически однородных по длине проводников *А* и *В* (например, меди и платины), при подогреве спая *1* появляется электрический ток, который в спае *1* направлен от платины *В* к меди *А,* а в холодном спае *2* – от меди *А* к платине *В*.

При подогреве спая *2* ток получает обратное направление. Такие токи называются термоэлектрическими. Электродвижущая сила, обусловленная неодинаковыми температурами мест соединения *1 и 2,* называется термо э.д.с., а создающий ее преобразователь – *термоэлектрическим термометром* (старое название – термопара).

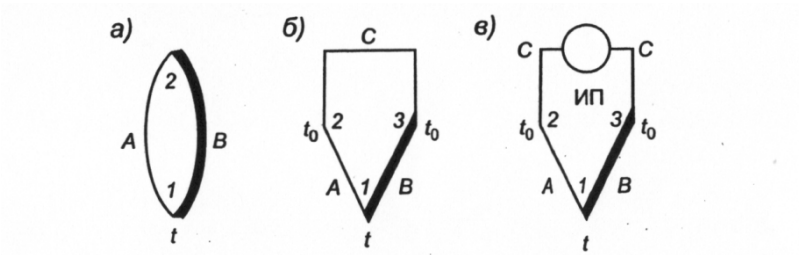



Рис. 3.15. Термоэлектрические цепи термоэлектрических термометров:
*а* – цепь из двух различных однородных проводников; *б* – с третьим проводом, включенным в разрыв холодного спая; *в* – с включением в свободные концы измерительного прибора ИП

Принцип действия такого термометра состоит в том, что если проводник нагрет по длине неравномерно, то на его нагретом конце повышается концентрация свободных электронов, которые диффундируют к холодному концу. При этом горячий конец заряжается положительно, а холодный – отрицательно. Если замкнутая цепь состоит из двух различных проводников *А* и *В,* то разность термо *э.д.с.,* возникающих в каждом проводнике, зависит от температуры спаев *t*.

Вследствие того, что в различных металлах плотность свободных электронов неодинакова, в месте соприкосновения двух разнородных металлов, например в спае (рис. 3.15, *б*), электроны будут диффундировать из металла *А* в металл с меньшей плотностью электронов *В* в количестве большем, чем из металла *В* в металл *А*. Поэтому между

металлами *A* и *B* возникает контактная разность потенциалов.

Поскольку плотность электронов в металле зависит также и от температуры спая металлов *A* и *B*, то в месте соприкосновения этих проводников при любых температурах возникает термо *э.д.с.*, значение и знак которой зависят от природы металлов *A* и *B* и температуры места их соприкосновения.

В представленной на рис. 3.16, *б* замкнутой цепи из двух разнородных проводников *A* и *B* появляется термоток. Направление этого тока в спае *2* определяет знак как самого проводника, так и термо *э.д.с.* Поскольку в рассматриваемой цепи ток в спае *2* направлен от меди *A* к платине *B* то термоэлектрод *A* – термоположительный, а *B* – термоотрицательный. Общая термо *э.д.с.* является функцией температур $t$ и $t_0$ и зависит от физической природы проводников.

Конструкции термоэлектрических термометров разнообразны и зависят в основном от условий их применения. Типовая конструкция приведена на рис. 3.16. Концы термоэлектродов *10* сварены между собой и образуют горячий спай *11*. По всей длине термоэлектроды изолированы друг от друга керамическими изоляторами *9*.

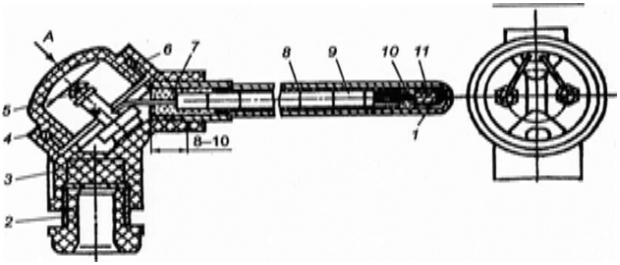



Рис. 3.16. Конструкция термоэлектрических термометров

Свободные концы термоэлектродов присоединяются к контактам колодки *5*. Контактные зажимы и термоэлектроды помещены в защитную арматуру *8* и герметизированы эпоксидным компаундом *7*.

Водозащитная головка термометра *6* закрыта крышкой *4*. Сальниковый ввод головки *3* со штуцером *2* допускает использование кабеля наружным диаметром до 11 мм. Горячий спай термопары изолирован от защитной арматуры керамическим наконечником *1*.

Термоэлектрические термометры градуируются при температуре свободных концов (холодного спая) $t_0$ = 0 °С. Действительная темпера-

тура свободных концов может быть постоянной, но отличаться от 0 °С. На практике температура свободных концов изменяется в зависимости от режимов работы технологических агрегатов и условий окружающей среды. Поэтому свободные концы термоэлектрического термометра стараются удалить от нагретых поверхностей и вывести в зону относительно низкой постоянной температуры. Для этого не увеличивают длину термоэлектрического термометра, а выполняют продление электродов термометра с помощью гибких удлиняющих проводов, обычно называемых термоэлектродными или компенсационными. Компенсационные провода изготавливают из более дешевых материалов, чем термоэлектроды термометров, что весьма актуально при применении термоэлектрических термометров с электродами из благородных металлов.

Таким образом, при применении компенсационных проводов свободными концами термоэлектрического термометра можно считать места соединения компенсационных проводов с медными жилами или с зажимами измерительного прибора, если компенсационные провода присоединяются к ним непосредственно.

Пределы измерения термоэлектрических термометров зависят от материала термоэлектродов. Термометры типа ТПП с платинородий-платиновыми термоэлектродами применяются для диапазона температур от –20 до +1300 °С (допускается до 1600 °С при кратковременных измерениях); типа ТПР с платинородий-платинородиевыми – от –50 до +1000 °С (1800 °С кратковременно); типа ТХА с хромель-алюмелевым – от –50 до +1100 °С (1300 °С кратковременно); типа ТХА с хромель-алюмелевыми – от –50 до +600 °С (800 °С кратковременно).

Для измерения термо *э.д.с.* в комплекте с термоэлектрическими термометрами в качестве вторичных приборов применяются магнитоэлектрические милливольтметры и автоматические потенциометры. Последние, получившие наибольшее распространение, применяются для непрерывного измерения, записи, сигнализации или регулирования температуры в комплекте с термометрами.

## 3.4. Измерение и визуализация уровня жидкостей в закрытых емкостях и открытых каналах

По характеру выходной величины различают уровнемеры с плавным выходом, предназначенные для непрерывного измерения, и с ре-

лейным выходом, называемые уровнемерами-сигнализаторами.

Уровнемеры – это датчики, предназначенные для непрерывного измерения уровня жидкостей. Их работа базируется на определённых физических принципах, благодаря которым электронный блок уровнемера преобразует значение уровня жидкости в пропорциональный аналоговый сигнал или в цифровой код.

Сигнализаторы – это датчики, предназначенные для определения заданного положения уровня (заполнение/опустошение) жидкости в ёмкости или трубе. Такие датчики имеют дискретный (релейный или транзисторный) выходной сигнал. Как правило, срабатывание сигнализатора происходит при блокировании или освобождении чувствительного элемента жидкостью.

Датчики уровня жидкостей делятся на два типа: контактные (весь датчик или его часть контактирует с измеряемой средой) и бесконтактные (измерение происходит без контакта с жидкой средой). Каждый из этих типов имеет достоинства и недостатки и находит своё применение в той или иной области.

Все датчики уровня жидкостей различаются по функционалу назначению (уровнемеры, сигнализаторы), типу (контактные, бесконтактные), по принципу действия (емкостные, гидростатические, байпасные, магнитострикционные, магнитные, микроволновые рефлексные, буйковые, бесконтактные, микроволновые радарные, радиоизотопные, табл. 3.1).

Таблица 3.1. **Классификация датчиков уровня жидкости**

| Виды | Уровнемеры | Сигнализаторы |
|---|---|---|
| Контактные | Емкостные | Емкостные/Емкостно-частотные (RF) |
| | Гидростатические | Гидростатические |
| | Байпасные | Оптические |
| | Магнитострикционные | Вибрационные |
| | Магнитные | Поплавковые магнитные |
| | Микроволновые рефлексные | Поплавковые кабельные |
| | Буйковые | Кондуктивные |
| Бесконтактные | Ультразвуковые | Ультразвуковые |
| | Микроволновые радарные | |
| | Радиоизотопные | |

*Емкостные датчики уровня* – это экономичное решение для контроля уровня там, где не возникает вспенивания и налипания среды на датчик, а также там, где не требуется высокая точность измерения уровня. Как правило применяется для измерения уровня жидкости в небольших резервуарах. Для пищевых продуктов и агрессивных сред рекомендованы модели с пластиковым покрытием измерительного зонда. Существенным недостатком является высокая погрешность при измерении жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon = 1{,}5\ldots3{,}0$), а также неспособность работать с диэлектрическими жидкостями.

Однако производителям удалось решить проблему обнаружения жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью и проблему определения границы раздела сред с близкими значениями диэлектрической константы. *Емкостно-частотный сигнализатор* в отличие от емкостного, благодаря RF-технологии и тонкой настройке способен детектировать слабопроводящие жидкости и одновременно не реагировать на пену.

Форма электродов может быть различной, чаще всего используют цилиндрические электроды, занимающие весь объем жидкости и газового пространства. Схема емкостного уровнемера приведена на рис. 3.17. Первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод *1* (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке *2* (рис. 3.17, *а*). Стержень вместе с трубой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости Н и от диэлектрической проницаемости $\varepsilon$ жидкости, которая может изменяться с увеличением ее температуры и изменением состава.

На рис. 3.17, *в* приведена электрическая схема емкостного уровнемера. Измерение электрической емкости первичного преобразователях *C* производится неуравновешенным мостом переменного тока, плечами которого являются индуктивности $L_1$ и $L_2$, емкость $C_1$ и емкость первичного преобразователях С. При изменении уровня изменяется емкость $C_x$, что приводит к изменению выходного напряжения моста *U*.

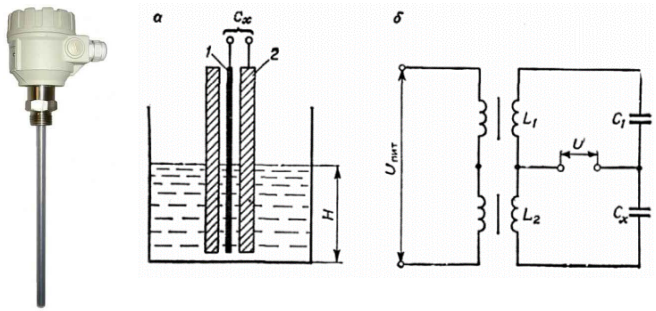



Рис. 3.17. Емкостной уровнемер: *а* – внешний вид; *б* – устройство датчика; *в* – электрическая схема уровнемера; *1* – электрод; *2* – труба

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

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

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

*Гидростатические уровнемеры и сигнализаторы* имеют более высокую точность измерения по сравнению с емкостными и такую же невысокую стоимость. Поэтому являются оптимальным выбором по соотношению цена/качество. Вычисление значения уровня происходит благодаря измерению давления столба жидкости, поэтому гидростатические датчики применяются в открытых резервуарах или в закрытых, но в которых давление воздушной среды соответствует атмосферному, в противном случае уровнемер выдаст некорректные результаты. В том числе на определение уровня влияет плотность жидкости, для применения гидростатических уровнемеров необходимо быть уверенным, что её значение остаётся постоянным на протяжение всего времени измерения. Поэтому не рекомендуется использовать гидростатический метод определения уровня для жидкостей с переменной плотностью (радиохимическое производство, нефтепродукты при изменении температуры). Применяются для контроля уровня чистых и сточ-

ных вод, жидких пищевых продуктов или химических веществ, не реагируют на пену. Являются фактически безальтернативным решением для измерения уровня жидкости в скважинах.

Использование гидростатического метода определения уровня в погружных устройствах основано на преобразовании измеренных значений давления столба жидкости над датчиком в уровень этого столба. Преобразователь формирует унифицированный выходной сигнал. Величина давления, оказываемого на датчик, складывается из давления водяного столба и атмосферы. Атмосфера компенсируется при помощи связи датчика с ней через специальную трубку.

Уровень воды рассчитывается по стандартным формулам (рис. 3.18).

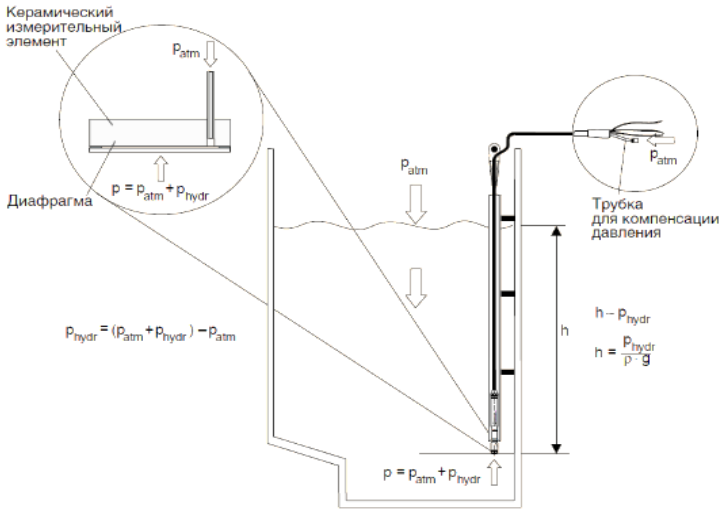



Рис. 3.18. Принцип работы гидростатического уровнемера

Работа *байпасных уровнемеров* основана на принципе сообщающихся сосудов, что делает процесс измерения весьма наглядным и понятным. Такие уровнемеры применяются в небольших резервуарах, находящихся под давлением с температурой рабочей среды до +250 °С. Могут использоваться совместно с магнитострикционными уровнемерами, что позволит их интегрировать в АСУ. Байпасные уровнемеры не следует применять с вязкими жидкостями или жидко-

стями вязкость которых повышается при снижении температуры, так как температура жидкости в байпасной камере из-за тепловых перемычек в соединительной арматуре ниже чем в сообщающимся с ним сосуде (рис. 3.19).

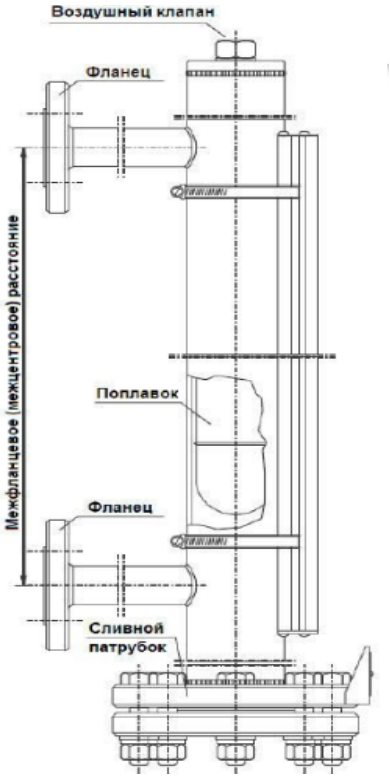



Рис. 3.19. Устройство байпасного поплавкового магнитного уровнемера

Работа байпасного поплавкового магнитного уровнемера NivoFlip основана на принципе сообщающихся сосудов. Уровень в поплавковой камере идентичен уровню в резервуаре.

Прибор состоит из байпасной трубы, присоединяемой на боковую стенку емкости при помощи резьбового, фланцевого соединения, либо с помощью приварных патрубков. Труба устанавливается максимально

плотно к резервуару, чтобы обеспечить идентичность условий в измерительной трубе и резервуаре. Внутри трубы располагается поплавок с магнитами, который всегда находится на поверхности измеряемого продукта. Через стенку трубы магнитное поле поплавка взаимодействует с локальным дисплеем, который представляет собой линейку двухцветных магнитных индикаторов. Эти индикаторы переворачиваются в зависимости от уровня и меняют свой цвет. Таким образом, визуальное наблюдение за уровнем является однозначным и не требующим вспомогательной энергии.

*Магнитострикционные и магнитные уровнемеры* относятся к типу поплавковых, это значит, что поплавок «лежит» на поверхности жидкости и измерение уровня происходит относительно положения этого поплавка. Такие уровнемеры отличаются большей точностью, особенно магнитострикционные. Их целесообразно применять при коммерческом учёте светлых нефтепродуктов, химических веществ и других дорогостоящих жидкостей. Поплавковые уровнемеры подходят для измерения уровня пенящихся жидкостей, однако не применим с вязкими жидкостями.

*Микроволновые рефлексные уровнемеры* конструктивно состоят из электронного блока и волновода. Длина волновода должна соответствовать высоте резервуара, что ограничивает применение датчиков в высоких резервуарах. С такой бедой сталкиваются все датчики с аналогичной конструкцией (емкостные, магнитные, магнитострикционные). Однако принцип действия и конструкция рефлексного датчика делает его высокоточным и пригодным для использования в тяжёлых условиях (высокая температура и давление), а также с пенящимися и налипающими жидкостями. Этот вид уровнемеров можно назвать наиболее универсальным, подходящими для применения фактически с любыми жидкостями, не зависимо от давления воздушной среды над поверхностью жидкости или диэлектрической проницаемости среды.

*Буйковые уровнемеры* – это датчики для тяжёлых условий, в которых ко всему прочему требуется высокая точность измерений. Принцип работы буйковых уровнемеров схож с работой поплавковых датчиков и основан на использовании закона Архимеда. Некоторые модели способны обеспечивать непревзойдённые результаты измерения при температурах от –196 °C до +500 °C и давление рабочей среды до 414 атмосфер. Отсюда складывается высокая стоимость. Как правило используются на нефтехранилищах и в химической промышленности.

Буйковые уровнемеры работают на ареометрическом принципе Входным параметром датчика уровнемера является действующая на

буек сила, величина которой пропорциональна глубине погружения буйка в жидкость. Промышленностью выпускаются буйковые уровнемеры с унифицированными электрическими выходными сигналами в виде постоянного тока 0–20 и 0–5 мА и выходом в виде давления воздуха.

На рис. 3.20 показана принципиальная электрическая схема уровнемера УБ-Э. Выталкивающая сила, действующая на буек *1*, через подвижную опору *2* и систему рычагов *3* перемещает плунжер *6* в катушке рассогласования *7*.

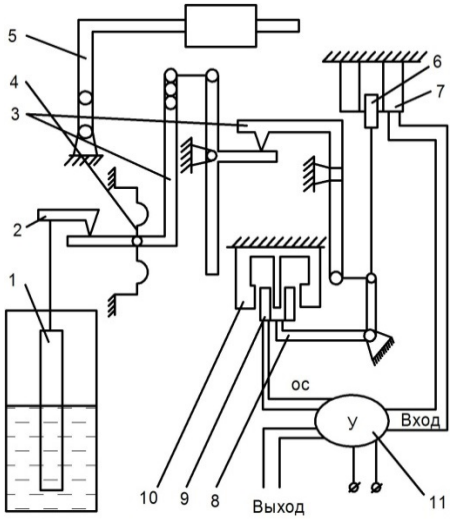



Рис. 3.20. Принципиальная схема уровнемера УБ-Э: *1* – буек; *2* – подвижная опора; *3* – система рычагов; *4* – мембрана; *5* и *8* – рычаги; *6* – плунжер; *7* – катушка неподвижная; *9* – катушка подвижная; *10* – магнит; *11* – полупроводниковый усилитель; ОС – сигнал обратной связи; У – усилитель

Сигнал рассогласования подается на вход полупроводникового усилителя *11*, к выходу которого подключена подвижная катушка *9* с магнитоэлектрической обратной связью ОС. Сила взаимодействия катушки *9* с магнитом *10* через рычаг *8* компенсирует выталкивающее действие жидкости на буек, и система приходит в равновесие. Унифицированный сигнал постоянного тока снимается с выходного усилите-

ля У и может использоваться для дистанционного измерения или в системе автоматического регулирования.

Рычаг *5* с навинченным противовесом служит для начального уравновешивания веса буйка, т. е. установки нуля. Мембрана *4* применяется для разделения измерительной части прибора и буйка, выпускаемые уровнемеры имеют предел измерения от 0–20 до 0–16000 мм, который определяется габаритами буйка. Масса буйка составляет от 2,6 до 5,3 кг, а длина – от 40 до 16000 мм.

Сигнализатор уровня типа СУЖ с электроконтактным выходом служит для сигнализации изменения уровня воды в диапазоне до 45 мм.

*Микроволновый радарный уровнемер* – это универсальное устройство непрерывного измерения уровня жидкостей. Обладает всеми преимуществами бесконтактного метода измерения и отличается крайне высокой точностью. Применим со всеми жидкими средами, исключением в некоторых случаях может стать пена. Помехой для импульс-радарного уровнемера может стать газовая подушка над поверхностью жидкости, в таком случае следует применять FMCW-радарные уровнемеры. Наилучшее применение таких датчиков – это резервуары с медленным изменением уровня жидкости, где важна высокая точность измерения. Недостатком может стать их высокая стоимость.

*Ультразвуковые датчики уровня* ещё один бесконтактный тип датчиков. По большому счёту, именно ультразвуковые датчики наиболее часто применяются для бесконтактного контроля уровня жидкостей. Ведь далеко не всегда важна очень высокая точность измерения как у радарных датчиков, а стоимость таких устройств в несколько раз ниже. Ограничение на применение накладывают пенящиеся жидкости и ёмкости в которых образуется газовая подушка (емкости с азотной кислотой), собственно, как и в случае с импульс-радарными уровнемерами.

*Оптические сигнализаторы уровня жидкостей* – это миниатюрные датчики, предназначенные для контроля уровня в небольших ёмкостях и резервуарах, находящихся под вибрацией.

*Вибрационные сигнализаторы* или как их ещё называют «вибровилки» врезаются в ёмкость на требуемых уровнях. Чувствительный элемент постоянно вибрирует, что позволяет использовать датчик с вязкими и пенящимися жидкостями, не боясь ложных срабатываний. Такие датчики имеют среднюю точность и стоимость, относительно других сигнализаторов.

*Поплавковые сигнализаторы* наиболее простые и экономичные устройства контроля уровня жидкости и сточных вод, а также слабо-

агрессивных жидких сред. Поплавковые сигнализаторы делятся на два типа – это поплавковые кабельные и поплавковые магнитные сигнализаторы. Отличие заключается в том, что кабельные имеют определённую длину кабеля и погружаются в жидкость через верх резервуара, а магнитные врезаются в боковую стенку ёмкости на требуемом уровне. Для агрессивных сред поплавок и кабель изготавливаются из различных пластиков. Как правило их применяют для включения/отключения насосов. Отличаются низкой ценой и невысокой точностью.

Поплавковые датчики уровня используются и для измерения положения затворов. В этом случае преобразующая часть датчиков вместо поплавка кинематически сочленяется с затвором или его приводом. Наряду с этим для измерения положения затворов перегораживающих сооружений выпускаются специальные устройства типа ДПЗ-1, ДПЗ-2 и ДПМ. На рис. 3.21 представлена схема датчика положения затвора ДПЗ-1.

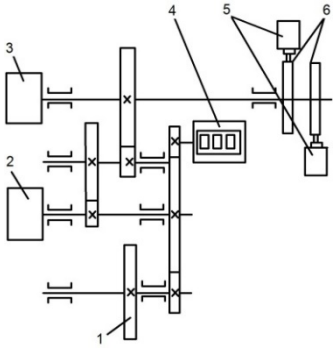



Рис. 3.21. Схема датчика положения затвора ДПЗ-1: *1* – звездочка; *2* и *3* – реостатные преобразователи соответственно точного и грубого отсчета; *4* – счетчик местного отсчета; *5* – микровыключатели; *6* – кулачки

Звездочка *1* сочленяется с винтом затвора, при перемещении которого поворачивается и с помощью зубчатых передач вращает счетчик местного отсчета *4*, ползунки реостатных преобразователей точного *2* и грубого *3* отсчетов. Для сигнализации крайних положений затвора применяются микровыключатели *5*, переключение которых выполняется кулачками *6*. В устройстве ДПЗ-2 вместо реостатных преобразователей дистанционных измерений устанавливается телемеханический частотный преобразователь.

В мелиорации применяются приборы и устройства для измерения расхода воды в закрытых трубопроводах и открытых каналах. Для измерения расходов воды в закрытых трубопроводах применяются расходомеры постоянного и переменного перепада, а также индукционные.

Принцип действия расходомеров постоянного перепада основан на восприятии динамического давления потока, действующего на чувствительный элемент.

## 3.5. Измерение влажности

Объектом измерения влажности в сельскохозяйственном производстве являются воздух и почва. В закрытых помещениях (насосных станциях, диспетчерских пунктах и т. д.) влажность, наряду с температурой, влияет на комфортные условия, работоспособность и общее состояние людей; условия работы оборудования, аппаратуры и приборов, а содержание влаги в приземном воздухе – на характер и интенсивность биохимических процессов в растениях, косвенно характеризует влагообеспеченность выращиваемых культур.

Важное значение имеет измерение влажности почвы, которая является основным параметром при создании автоматических систем управления влажностным режимом почв на мелиорированных землях.

Для дистанционного измерения и записи относительной влажности используется автоматический электронный психрометр типа ПЭ. Как преобразователи используются термометры сопротивления, один из них смачивается водой из специального резервуара. Термометры размещены в каналах, через которые с помощью вентилятора прокачивается исследуемый воздух. В качестве вторичного прибора используется автоматический электронный мост. Разность сопротивлений термометров пропорциональна психрометрической разности, что позволяет проградуировать шкалу моста непосредственно в единицах относительной влажности.

Измеритель относительной влажности воздуха типа УДРОВ работает на гигрометрическом методе измерений. Первичный преобразователь в приборе – влагочувствительная пленка, сопротивление которой меняется с изменением влажности окружающей среды. Как измерительный прибор используется электронный автоматический мост.

Для измерения влажности почвы применяются прямые и косвенные методы. Из прямых наиболее распространен термостатно-весовой метод. Он является основным при контрольно-испытательных измере-

ниях и тарировании влагомеров, принцип действия которых основан на косвенных методах измерения. Однако этот метод трудоемок, предусматривает отбор проб и их сушку в течение длительного времени (до 24 ч и более).

Косвенные методы измерений предусматривают оценку влажности почвы по изменению различных ее свойств. Наиболее широко используют тензиометрический, кондуктометрический, емкостный и нейтронный методы.

Тензиометрическим методом измеряют всасывающее давление почвы, зависящее от влажности. Рассмотрим устройство и принцип действия выпускаемого серийно тензиометра типа АМ20-II (рис. 3.22).

Он состоит из закрытого трубчатого сосуда *2* с пористым наконечником *1*. Трубчатый сосуд соединен с измерительной чашкой *3*, одна из стенок которой выполнена в виде мембраны *4*. В центре ее закреплен штифт *7*, связанный через механическую передачу со съемным микрометрическим индикатором перемещения *6*. Трубчатый сосуд заполняется кипяченой или дистиллированной водой, после чего герметично закрывается пробкой *5*. Прибор устанавливается в предварительно пробуренную скважину глубиной до 1 м, соответствующую исследуемому слою почвы.

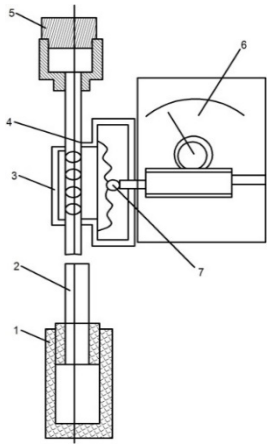



Рис. 3.22. Почвенный тензиометр: *1* – пористый наконечник; *2* – трубчатый сосуд; *3* – измерительная чашка; *4* – мембрана; *5* – пробка; *6* – микрометрический индикатор перемещения; *7* – штифт

За счет всасывающей силы вода через стенки пористого наконечника всасывается в почву и внутри трубчатого сосуда создается разрежение, вызывающее прогиб мембраны. По показаниям индикатора прогиба мембраны определяют всасывающую силу, а при соответствующей тарировке и влажность почвы. Прибор пригоден для измерения влажности почв в диапазоне от полной влагоемкости (ПВ) до 0,7–0,8 наименьшей влагоемкости. При более низких влажностях, вследствие проникновения воздуха через пористый наконечник в трубчатый сосуд, точность измерений резко снижается и погрешность достигает 5 % и более влажности.

Для автоматизации используют тензиометры с вакуумметрическими электроконтактными преобразователями, позволяющие получить сигнал о достижении предельно допустимых значений влажности.

Для того чтобы получить аналоговый выходной сигнал, применяют тензиометры с емкостными и ферродинамическими преобразователями, однако в настоящее время они серийно не выпускаются.

Принцип действия кондуктометрических влагомеров основан на измерении электрической проводимости при постоянном и переменном токе низкой частоты, зависящей от влажности почвы.

В кондуктовлагометрии используются методы: непосредственного измерения сопротивления почвы; измерения сопротивления промежуточного тела, помещенного в исследуемую почву. К приборам непосредственного измерения относится влагомер типа «Днестр», который использует зависимость сопротивления почвы и электродвижущей силы поляризации, возникающей на электродах первичного преобразователя в почве, от влажности. Влагомер состоит из зондового контактного преобразователя, вторичного прибора и используется для определения сроков полива. Недостатком является влияние на его показания солевого состава, структуры почвы и переменного характера контакта почва – электроды.

Более стабильные показания обеспечивает метод измерений с использованием промежуточного сорбента. Сущность метода заключается в том, что измеряется сопротивление пористого сорбента, помещенного в почву и находящегося в равновесном по влажности состоянии с почвой. Гипс, нейлон, стекловату и другие материалы используют в качестве сорбента.

Наиболее распространены преобразователи с промежуточными гипсовыми блоками. Их электроды изготовляют из никеля или другого

коррозионностойкого материала и размещают в гипсовом блоке. Для удобства установки в пробуренную скважину гипсовый блок чаше всего изготовляют в форме цилиндра или усеченного конуса с диаметром основания 25–50 мм. Величина сопротивления между электродами зависит от влажности гипса и при установлении влажностного равновесия характеризует влажность почвы. Для устранения влияния поляризации измерения выполняют на переменном токе частотой 1–2 кГц.

Измерения с применением гипсовых преобразователей позволяют существенно уменьшить влияние неинформативных параметров, в частности изменения солевого состава. При движении влаги из почвы в гипсовый блок солевой раствор нейтрализуется гипсом, что ограничивает срок службы преобразователя, который, как правило, не превышает одного летнего сезона. Гипсовые преобразователи имеют и другие недостатки: инерционность, подверженность влиянию гистерезисных явлений.

Емкостный метод основан на измерении параметров первичного преобразователя (электрической емкости и угла диэлектрических потерь), функционально зависящих от влажности. Существенное отличие диэлектрической проницаемости (ДП) воды от ДП других компонентов обеспечивает ощутимую зависимость суммарной диэлектрической проницаемости почвы от ее влажности.

Конструкция емкостных преобразователей влажности зависит от свойств исследуемой среды и условий измерений. Для измерения влажности почвы без отбора проб в естественных условиях залегания чаще всего используют преобразователи цилиндрической формы с гребенкообразными и спиралеобразными электродами, которые можно устанавливать в пробуренную скважину практически без нарушения структуры измеряемого слоя почвы.

Чтобы улучшить работу измерительной схемы исключением потерь, вызванных токами прямой проводимости, электроды преобразователей могут покрываться водостойкой изоляцией (фторопластом, слоем эпоксидной смолы и водостойкими лаками).

Напряжение с кварцевого генератора усиливается резонансным усилителем, собранным на транзисторе Т2, и через эмиттерный повторитель и трансформатор подается в диагональ питания мостовой схемы, в одно из плеч которой включен преобразователь влажности.

Рассмотренные приборы предназначены для измерения точечного значения влажности в месте установки первичного преобразователя.

В системах автоматического управления поливом требуется информация об интегральном значении влагозапасов по площади в активном слое почвы. Для получения такой информации необходимо использовать зависимость:

$$U = \iint W(t,S)dtdS, \tag{3.11}$$

где $U$ – влагосодержание в слое почвы толщиной $t$ на площади $S$;

$W(t, S)$ – влажность в контролируемой точке поля.

Интегрирование по глубине слоя почвы достигается выбором длины первичного преобразователя. Усреднение по площади выполняют путем контроля влажности в нескольких характерных точках для данного участка с последующим переносом полученных усредненных результатов на всю площадь. Количество контролируемых точек зависит от рельефа местности, разнородности минерального и механического состава почвы.

Нейтронный метод измерения влажности основан на взаимодействии быстрых нейтронов, испускаемых источником с ядрами атомов водорода почвенной влаги, и регистрации тепловых нейтронов, появляющихся в результате взаимодействия. Так работает нейтронный индикатор влажности почво-грунтов типа НИВ-2. Влагомер устанавливается в предварительно пробуренную вертикальную скважину. Плутониево-бериллиевый источник питания и счетчик располагаются в одном корпусе и экранируются между собой. Плотность потока тепловых нейтронов и интенсивность $v$-излучения регистрируются счетчиком с кадмиевым экраном. Влажность почвы определяется по тарировочной кривой в зависимости от скорости счета. Прибор измеряет объемную влажность в диапазоне 20–40 % точностью до 2 % и является влагомером локального влагосодержания с радиусом сферы исследуемой почвы до 30 см.

Для измерения влажности в поверхностном слое почвы без погружения измерителя в скважину используется универсальный нейтронный влагомер НВУ-1. Принцип действия его аналогичен прибору НИВ-2. Диапазон измеряемых влажностей – от 4 до 42 % по объему. Прибор НВУ-1 изготовляется также с погруженным измерительным зондом, который устанавливается в скважину и позволяет измерять влажность более низких слоев почвы.

Определение сроков и норм полива при использовании широкоза-

хватной дождевальной техники требует получения оперативной информации об усредненных значениях влагосодержания почвы вдоль фронта полива. С этой целью разработан нейтронный влагомер типа «Крот». Для измерений в почве на глубине 35 и 90 см стационарно прокладываются полиэтиленовые трубы. По ним протягивается измерительный зонд с помощью электропривода или пневмотяги. В зонде смонтированы источник излучений, приемник и запоминающее устройство. После прогонки зонда по трубам считывают данные измерений с запоминающего устройства и по тарировочным графикам или таблицам определяют влагозапасы в исследуемом слое.

Достоинствами нейтронных влагомеров являются широкий диапазон измерений и бесконтактность с измеряемой средой. К недостаткам относится влияние на данные измерений имеющихся в почве аномальных поглотителей медленных нейтронов *B, Cl, Li, K, H* в твердой фазе почвы и особенно в гумусовом горизонте, плотности почвы, а также опасность для биологической среды, что требует применения специальных средств защиты.

# 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

## 4.1. Электрическая цепь и ее элементы

Основные электротехнические устройства по своему назначению подразделяются на устройства, генерирующие и использующие электрическую энергию.

Чтобы привести в действие устройство, использующее электрическую энергию (приемное устройство), на его входных зажимах необходимо создать и поддерживать определенную разность электрических потенциалов – электрическое напряжение. Для этой цели приемное устройство подключают к генерирующему, образуя тем самым комплекс устройств – электрическую цепь.

*Электрической цепью* называют совокупность устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии, процессы, которые могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, электрическом напряжении и электродвижущей силе (*э.д.с.*).

Отдельные устройства, входящие в электрическую цепь, называют также *элементами электрической цепи*. Часть электрической цепи, содержащую выделенные в ней элементы, называют *участком цепи*.

Элементы цепи, предназначенные для генерирования электрической энергии, называют *источниками питания*, а элементы, использующие электрическую энергию, – *приемниками электрической энергии*.

В источниках в электрическую энергию преобразуются иные виды энергии: механическая в машинных генераторах, химическая в гальванических элементах и аккумуляторах, тепловая в термоэлементах, лучистая в фотоэлементах и т. д.

В приемниках, наоборот, электрическая энергия преобразуется в иные виды энергии: механическую в электрических двигателях, химическую в аккумуляторах, тепловую в различных нагревательных приборах и печах, лучистую в осветительных приборах и т. д.

Передающие элементы цепи являются звеном, связывающим источники и приемники. Кроме электрических проводов, в это звено могут входить приборы контроля и управления, а также преобразующие устройства (трансформаторы, выпрямители и др.), в которых электрическая энергия доводится до такого состояния, когда ее становится удобно передавать на расстояния и распределять между приемниками.

Преобразователи электрической энергии с первичной стороны, куда поступает преобразуемая энергия, можно рассматривать как приемники, а со вторичной стороны, от которой преобразованная энергия отводится, – как источники.

## 4.2. Классификация электрических токов и напряжений

Элементы цепи выполняют свое назначение, когда цепь замкнута и в ней имеет место, направленное движение носителей электрических зарядов – электрический ток.

Величина (сила) электрического тока определяется количеством электричества (зарядом), проходящего сквозь поверхность, равную поперечному сечению проводника, в единицу времени.

Электрический ток, величина и направление которого остаются неизменными, называют *постоянным током* (рис. 4.1, *а*) и обозначают прописной буквой *I*.

Если за *t* секунд прошло *q* кулонов электрического заряда, то сила постоянного тока (в А) находится по зависимости (4.1). Отсюда заряд, который переносит постоянный ток за время *t*,

$$I = q/t,\ q = It. \qquad (4.1)$$

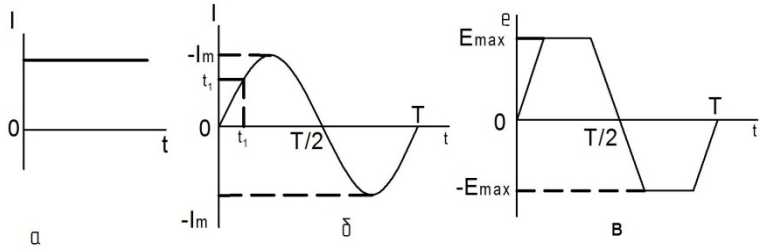



Рис. 4.1. Различные формы кривых постоянных и периодических токов (*а* и *б*) и *э.д.с.* (*в*)

Электрический ток, величина или направление которого не остаются постоянными, называют *изменяющимся,* или *переменным, током*. Значения изменяющегося тока в рассматриваемый момент времени называют *мгновенными значениями* и обозначают строчной буквой *i*. Ток *i* связан с зарядом *q* и временем *t* соотношением:

$$I = dq / dt. \tag{4.2}$$

За промежуток времени от 0 до *t* изменяющийся ток переносит заряд

$$q = \int_0^t idt. \tag{4.3}$$

Основной электрической единицей в Международной системе единиц измерения (СИ) является единица силы тока ампер. Заряд в этой системе измеряется в ампер-секундах или кулонах. Заряд в 1 Кл соответствует заряду $6{,}29 \cdot 10^{18}$ электронов. При токе в 1 А через поперечное сечение проводника в 1 с проходит заряд, равный заряду $6{,}29 \cdot 10^{18}$ электронов.

Формы кривых изменяющихся токов очень разнообразны. Доминирующее значение среди них имеют периодические токи. *Периодическими* называют такие токи, мгновенные значения которых повторяются через равные промежутки времени. Наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения тока повторяются, называют *периодами* и обозначают буквой Т. Число периодов в одну секунду называют *частотой периодического тока*; частоту измеряют в герцах и обозначают буквой *f*. Частота и период связаны соотношением:

$$F = 1 / T. \qquad (4.4)$$

Токи, изменяющиеся по гармоническому закону, называют *синусоидальными токами* (рис. 4.1, *б*). Общепринято синусоидальные токи называть переменными токами, хотя было бы целесообразнее переменными токами называть любые изменяющиеся токи.

Если закон изменения мгновенных значений периодического тока отличен от гармонического, то такой ток называют *несинусоидальным током* (рис. 4.1, *в*). Наибольшее значение синусоидального тока называют *амплитудой* и обозначают прописной буквой $I$ с нижним индексом $m$ ($I_m$). Наибольшее значение несинусоидального тока обозначают строчной буквой $i$ с нижним индексом max ($i_{\max}$).

Постоянные или изменяющиеся токи возникают в электрических цепях под действием *э.д.с.,* возбуждаемых в источниках в процессе преобразования в них какого-либо вида энергии в электрическую энергию. э.д.с. и напряжения в соответствии с законом изменения их мгновенных значений называют постоянными, изменяющимися, синусоидальными и несинусоидальными. Постоянные *э.д.с.* и напряжения обозначают прописными буквами и U, а изменяющиеся *э.д.с.* и напряжения – строчными буквами $e$ и $u$.

Совокупность величин, характеризующих воздействие на цепь *э.д.с* и возникающих в результате этого воздействия напряжений и токов, определяет режим работы электрической цепи и ее элементов.

## 4.3. Классификация электрических цепей и их элементов

В зависимости от того, для какого тока предназначается электрическая цепь, ее называют соответственно: «электрическая цепь постоянного тока», «электрическая цепь изменяющегося тока», «электрическая цепь синусоидального тока», «электрическая цепь несинусоидального тока».

Аналогично именуют и элементы цепей: «машина постоянного тока», «машина переменного тока», «источник постоянного тока», «приемник переменного тока» и т. д.

Элементы цепей и составленные из них цепи подразделяют еще по виду вольт-амперных (*в.а.х.*), вебер-амперных (*вб.а.х.*) и кулон-вольтных (*к.в.х.*) характеристик элементов цепи, выражающих зависимости их напряжения от тока $U(I)$, потокосцепления от тока $\psi(I)$, заряда от напряжения $q(U)$.

Примеры таких характеристик приведены на рис. 4.2, *а–в*. Элемен-

ты цепей, в.а.х., вб.а.х. и к.в.х. которых линейны, называют *линейными элементами* (л. э.). Нелинейные характеристики имеют нелинейные элементы (н. э.).

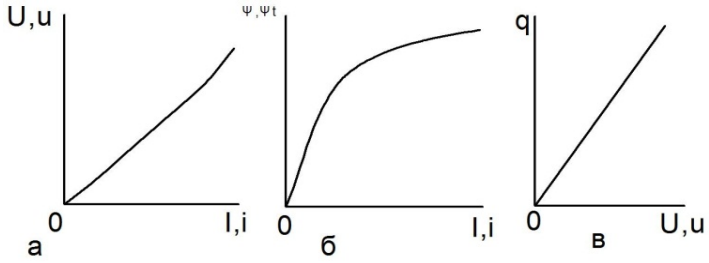



Рис. 4.2. Характеристики элементов цепи: *а – в.а.х.*; *б – вб.а.х.*; *в – к.в.х.*

Электрическую цепь, состоящую из линейных элементов, называют *линейной цепью*. Электрическая цепь, в которую входит хотя бы один н. э., называют *нелинейной цепью*. Электрические цепи постоянного и переменного токов различают также: по способу соединения их элементов – неразветвленные и разветвленные цепи, по числу источников электрической энергии – цепи с одним и несколькими источниками электрической энергии. Встречаются и другие наименования цепей, о которых будет сказано в последующих разделах.

## 4.4. Параметры элементов электрической цепи

Каждый элемент электрической цепи обладает свойствами поглощать электрическую энергию из цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (необратимый процесс), создавать свои магнитное и электрическое поля, энергии которых могут накапливаться и при определенных условиях возвращаться обратно в цепь (обратимый процесс). Чтобы характеризовать эти свойства, вводят понятие параметров элемента.

Параметр сопротивления $r$ характеризует свойство элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии. Известно, что мощность ($P$, $p$) преобразования электрической энергии пропорциональна квадрату тока ($I^2$, $i^2$), поэтому величина этого параметра определяется отношением $r = p / I^2$ для постоянного тока и $r = p / i^2$ – для переменного тока.

Свойства элемента цепи создавать собственное магнитное поле

(поле самоиндукции), когда в нем имеется электрический ток, характеризуют параметром индуктивности $L$. Параметр индуктивности является коэффициентом пропорциональности между током ($I$, $i$) и потокосцеплением ($\psi$, $\psi_t$) данного устройства: $\psi = LI$ или $\psi_t = Li$. Его называют коэффициентом самоиндукции и измеряют в генри ($Г_н$).

Вебер-амперная характеристика элемента дает возможность судить об изменении его параметра индуктивности в зависимости от тока.

Параметр взаимной индуктивности М характеризует свойство первого элемента с током $i_1$ создавать магнитное поле, частично сцепляющееся с витками $w_2$ второго элемента. Потокосцепление $\psi_{21}$ второго элемента (первый индекс), обусловленное током $i_1$ первого элемента (второй индекс), называют *потокосцеплением взаимоиндукции второго элемента*. Параметр взаимной индуктивности $M$ является коэффициентом пропорциональности между током первого элемента и созданным этим током потокосцеплением второго элемента: $\psi_{21} = MI_1$ или $\psi_{21} = Mi_1$.

Аналогичная связь имеется между потокосцеплением первого элемента, обусловленного током второго элемента: $\psi_{12} = MI_2$ или $\psi_{21} = Mi_2$.

Емкостный параметр $C$ характеризует свойство элемента накапливать заряды или возбуждать ими электрическое поле. Этот параметр является коэффициентом пропорциональности между напряжением и зарядом элемента: $q = CU$, $q = Cu$. О величине емкостного параметра при разных напряжениях можно судить по к. в. х. элемента.

В общем случае любое реальное устройство обладает всеми тремя параметрами: $r$, $L$ и $C$.

В настоящее время имеются специально изготовленные резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы, работу которых в определенных условиях с достаточной степенью точности можно характеризовать только одним параметром. Нарушение заданных условий приводит к возникновению явлений, характеризующихся другими параметрами.

Кроме специально изготовленных устройств с одним параметром, встречаются устройства, работу которых приближенно характеризуют также одним параметром. Например, лампы накаливания, печи нагрева характеризуют только параметром сопротивления, а некоторые обмотки возбуждения машин и аппаратов – только параметром индуктивности.

Основное свойство источника электрической энергии – способность создавать и поддерживать разность потенциалов на отдельных участках цепи, а также возбуждать и поддерживать электрический ток

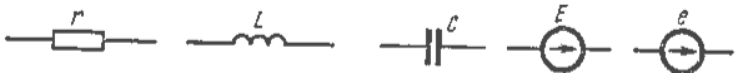
в замкнутой цепи – характеризуют его электродвижущей силой. Величина *э.д.с.* ($E,e$) равна той энергии, которую приобретает положительный заряд величиной в 1 Кл, перемещаясь под действием сторонних сил по источнику. Если за время $dt$ по источнику переменного тока проходит заряд $dq = idt$, то развиваемая источником энергия $dW_э = eqt = eidt$ и мгновенная мощность $p = dW_э /dt = ei$. Для источника постоянного тока развиваемые энергия и мощность соответственно равны: $W_э = EIt$ и $P = eI$.

Прохождение тока по источнику сопровождается потерей энергии внутри источника на нагрев. Эти потери характеризуют параметром сопротивления r. Поэтому параметр сопротивления наряду с *э.д.с.* является важнейшим параметром источника. В некоторых случаях в источниках переменного тока учитывают также параметр индуктивности $L$.

Элементы цепи, работу которых можно описать с помощью параметров $r$, $L$, $M$ и $C$, называют *пассивными*. Термин «пассивный» подчеркивает, что такие элементы не могут выполнить свое назначение без воздействия на них посторонних источников.

Элементы цепи, для описания работы которых, кроме пассивных параметров, необходимо вводить *э.д.с* называют *активными*. К активным элементам относят все источники электрической энергии и некоторые приемники, при описании процессов, в которых нельзя ограничиться только пассивными параметрами (аккумуляторы при зарядке, двигатели постоянного тока и др.).

Элементы цепи, обладающие только одним параметром, будем называть *идеальными*. Идеальный источник питания имеет только параметре, идеальный индуктивный элемент (идеальная индуктивная катушка) – только параметр $L$, идеальный емкостный элемент (идеальный конденсатор) – только параметр $C$; только один параметр сопротивления $r$ имеет резистивный элемент (резистор). На рис. 4.3 показаны обозначения этих элементов в схемах.




*а* *б* *в* *г* *д*

Рис. 4.3. Обозначения идеальных элементов: *а* – резистивного; *б* – индуктивного; *в* – емкостного; *г* – источника *э.д.с.* постоянного тока; *д* – источника э.д.с. изменяющегося тока

## 4.5. Изображение электрических цепей

При изучении процессов в электрических цепях их изображают графически при помощи схем соединения отдельных элементов. Иногда для наглядности элементы цепи в этих схемах изображают упрощенными рисунками (рис. 4.4). Приведенная на рисунке простейшая электрическая цепь постоянного тока состоит из источника постоянного тока *G*, электрической лампы *EL*, выключателя *Q* и соединительных проводов. Эта цепь названа простейшей потому, что она состоит только из одного источника и одного приемника.

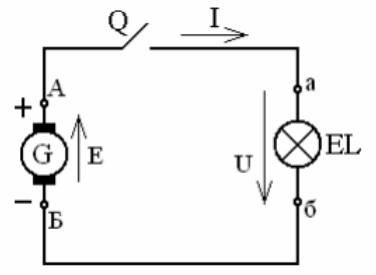



Рис. 4.4. Простейшая электрическая цепь постоянного тока

В настоящее время элементы цепи изображают при помощи установленных стандартных условных обозначений. Графическое изображение цепи с помощью условных обозначений называют *схемой цепи.*

На рис. 4.5, *а–д* приведены обозначения различных источников, а на рис. 4.6, *а–д* – приемников постоянного и переменного тока.

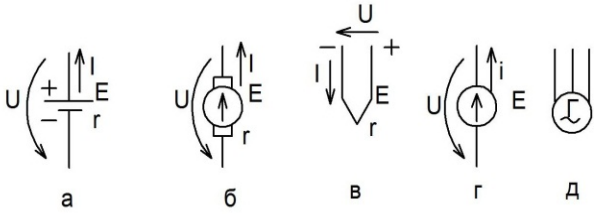



Рис. 4.5. Обозначения источников электрической энергии на схемах: *а* – гальванических элементов и аккумуляторов; *б* – генераторов постоянного тока; *в* – термопар; *г* – генераторов однофазного переменного тока; *д* – трехфазных генераторов

Пользуясь этими обозначениями, цепь, показанную на рис. 4.4 можно изобразить более простой схемой (рис. 4.7).

В качестве примера на рис. 4.8 изображена цепь, состоящая из источника питания переменного тока, конденсатора, осветительной лампы и реостата.

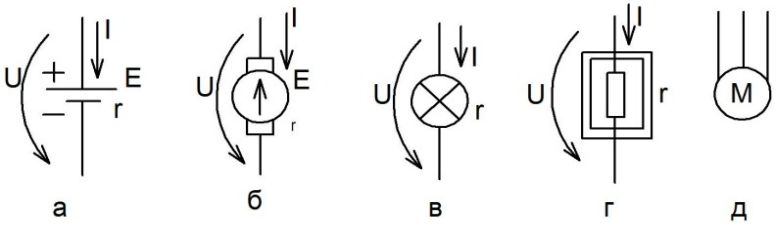



Рис. 4.6. Обозначения приемников электрической энергии на схемах:
*а* – гальванических элементов и аккумуляторов при зарядке; *б* – электродвигателей постоянного тока; *в* – электрических ламп; *г* – электрических печей нагрева; *д* – трехфазных электродвигателей

Воспользуемся этими схемами для того, чтобы ввести некоторые наименования отдельных участков и всей цепи, которые используются в дальнейшем при изучении цепей.

Источник питания образует внутренний участок цепи, а приемники совместно с соединительными проводами, амперметром и выключателем – внешний участок цепи или просто внешнюю цепь. Зажимы (полюса) *a* и *b* источника, к которым присоединяют внешнюю цепь, называют *выходными зажимами (полюсами)*. Зажимы *c* и *d* внешней цепи, при помощи которых ее присоединяют к проводам, идущим от источника, называют *входными зажимами (полюсами) внешней цепи*.

Часть цепи, имеющей два полюса, называют *двухполюсником*. Двухполюсники, содержащие источники, называют *активными*, а двухполюсники без источников – *пассивными*.

Следовательно, внутренние части простейших цепей (рис. 4.7 и 4.8) можно называть *активными участками,* или *активными двухполюсниками*, а внешние части цепей – *пассивными участками,* или *пассивными двухполюсниками.*

Соединение, при котором по всем участкам проходит один и тот же ток, называют *последовательным соединением участков*. Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким участкам, называют *контуром электрической цепи*. Цепь, схема которой показана на рис. 4.7, является одноконтурной цепью, состоящей из последовательно соединенных элементов.

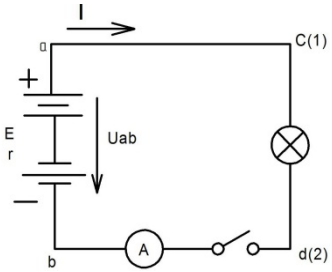



Рис. 4.7. Схема соединений элементов простейшей электрической цепи постоянного тока

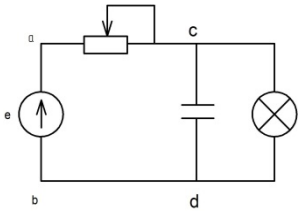



Рис. 4.8. Схема соединений элементов цепи переменного тока

Участок цепи, вдоль которого в любой момент времени ток имеет одно и то же значение, называют *ветвью*, а место соединения трех или большего числа ветвей – *узлом*.

Соединение, при котором все ветви присоединены к одной паре узлов, называют *параллельным соединением*. Схема соединений элементов цепи переменного тока (рис. 4.8) имеет два узла *c* и *d*, к которым подключены два приемника (лампа и конденсатор), соединенных параллельно. Параллельно соединенные участки находятся под одним и тем же напряжением. Электрическую цепь с параллельными и последовательными ветвями называют также *разветвленной цепью*. Разветвленная цепь является многоконтурной. Контуры, отличающиеся друг от друга хотя бы одной ветвью, являются независимыми.

Их представляют в схеме замещения только одним резистивным элементом. Но когда эту катушку включают в цепь постоянного тока или отключают от нее и при этом хотят установить законы изменения тока, ее представляют уже двумя последовательно соединенными резистивным и индуктивным идеальными элементами. Когда рассматривают работу катушки в цепях высокой частоты, для нее составляют схему замещения из резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Составление схем замещения реальных электротехнических устройств будет показано в последующих разделах курса.

## 4.6. Положительные направления токов и напряжений

Для однозначности описания процессов, происходящих в каком-либо элементе цепи, необходимо знать не только величины его тока и напряжения, но также их направления в рассматриваемый момент времени. Действительно, если задан график изменения тока (см. рис. 4.1, *б*) или его уравнение, то по ним можно утверждать, что ток через полупериод изменяет свое направление на обратное и вели-

чина его для момента $t_1$ положительна, но направление тока в элементе в этот момент неизвестно. Чтобы ответить на этот вопрос, одно из двух возможных направлений тока в элементе берут за основное и указывают его на схеме стрелкой. Стрелки, поставленные на схемах, указывают положительные направления *э.д.с*, напряжений и токов, т. е. такие направления, для которых значения обозначенных величин положительны.

Если, например, в заданный момент времени значения величин положительны: $E > 0$, $U > 0$, $I > 0$, $e > 0$, $i > 0$, то их действительные направления в этот момент времени совпадают с направлениями, указанными на схеме стрелками. Если значения этих величин отрицательны, то их действительные направления противоположны направлениям, указанным на схеме стрелками.

Рассмотрим примеры цепей и поясним значение поставленных на их схемах стрелок. На рис. 4.9 приведены схемы соединений двух простейших цепей постоянного (*а*) и изменяющегося (*б*) токов, состоящих из идеальных источников питания с *э.д.с.* Е и е и электрических ламп, подключенных непосредственно к внешним зажимам источников. На рис. 4.10 даны схемы замещения этих цепей, на которых электрические лампы представлены резистивными элементами с сопротивлением *r*.

На рис. 4.11 изображены графики *э.д.с.* источников питания.

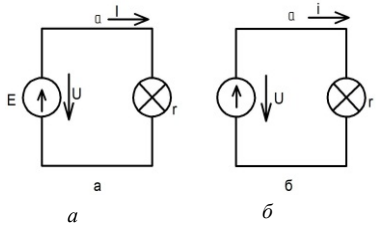



Рис. 4.9. Схемы соединений простейших цепей постоянного (*а*) и переменного (*б*) токов с идеальными источниками питания (с электрическими лампами)

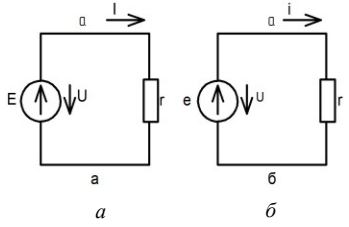



Рис. 4.10. Схемы замещения простейших цепей постоянного (*а*) и переменного (*б*) токов с идеальными источниками питания (с резистивными элементами)

Из физики известно, что за положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, за положительное направление *э.д.с.* – направление действия сторонних сил на положительный заряд, за положительное направление напряжения направление убывания потенциала. Так как положительные заряды

внутри источника движутся в направлении действия сторонних сил, а в приемнике – в направлении убывания потенциала, то положительные направления тока и *э.д.с.* источника, тока и напряжения приемника совпадают.

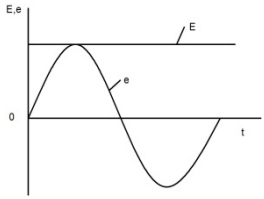



Рис. 4.11. Графики *э.д.с.* источников питания: постоянной *E* и синусоидальной *e*

Положительное направление напряжения на внешних зажимах источника противоположно положительному направлению тока источника. Следовательно, положительные заряды внутри источника в этот момент времени движутся в направлении возрастания потенциала, и их энергия возрастает на величину $qE = W_э$ или $qe = W_e$. В приемнике положительные заряды при этом движутся в направлении убывания потенциала, и их энергия убывает на величину $qU$ или $qu$. Развиваемая источником мощность $P = eI$ или $p = ei$ и мощность участка цепи $P = UI$ или $p = ui$ будут положительны только при совпадающих положительных направлениях *э.д.с.* и тока источника, а также напряжения и тока приемника.

Воспользуемся понятием о положительных направлениях для описания процесса в цепях, схемы которых приведены на рис. 4.12, *а* и 4.13, *а*. Предположим, что источники питания идеальны: $U = e$ и $u = e$, графики их напряжений заданы на тех же рисунках (рис. 4.12, *б* и 4.13, *б*), а подключение ламп к источникам осуществлено в момент прохождения и от отрицательных значений к положительным, т. е. в точке *O*.

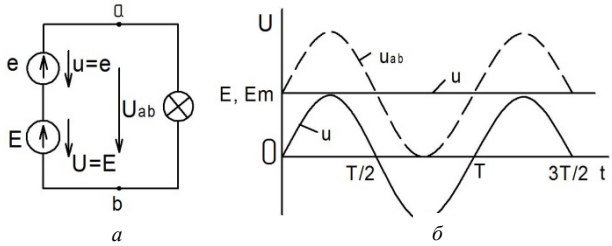



Рис. 4.12. Первая схема включения источников постоянной и синусоидальной *э.д.с.* (*а*) и графики напряжений отдельных источников и приемника (*б*)

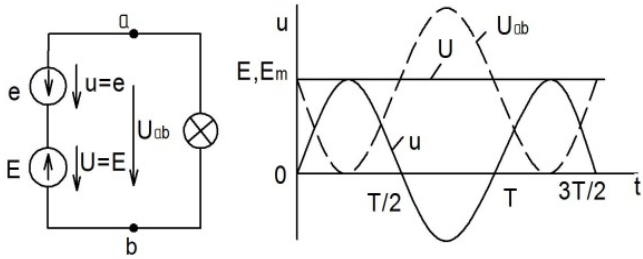



Рис. 4.13. Вторая схема включения источников постоянной и синусоидальной *э.д.с.* (*а*) и графики напряжений отдельных источников и приемника (*б*)

После включения лампы потенциал зажима, *a* относительно потенциала зажима *b* в первой схеме начнет увеличиваться, а во второй уменьшаться.

Следовательно, в первой схеме лампа должна светить более ярко.

При $t > T / 2$ яркость лампы в первой схеме уменьшается, а во второй – увеличивается. Изменение яркости ламп можно наблюдать и визуально, если частота синусоидальной *э.д.с.* мала (1–3 Гц) и имеется возможность осуществить подключение лампы в заданный момент времени.

# 5. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

## 5.1. Общие сведения о системах автоматизации

Под *управлением в технических системах* подразумевается процесс осуществления воздействий, соответствующих алгоритму управления.

Под *алгоритмом управления* понимают совокупность предписаний, определяющая характер воздействий извне на управляемый объект с целью выполнения им заданного алгоритма функционирования.

*Алгоритм функционирования* представляет собой совокупность предписаний для правильного выполнения технического процесса в каком-либо устройстве или совокупности устройств (системе).

В широком смысле под *алгоритмом* понимается предписание, определяющее содержание и последовательность операций, переводящих исходные данные в искомый результат (рис. 5.1).

*Управляемым объектом* называется устройство, осуществляющее технический процесс, нуждающийся в оказании специально организованных воздействий извне для выполнения его алгоритма функционирования.

Автоматическое управляющее устройство осуществляет воздействие на управляемый объект в соответствии с алгоритмом управления.

Управляемый объект и автоматическое управляющее устройство составляют автоматическую систему управления. Часть автоматической системы, на которую непосредственно подается внешнее воздействие, называется входом, а та часть системы, которая в соответствии с алгоритмом функционирования непосредственно осуществляет процесс управления, – выходом.

Автоматическая система испытывает влияние внешних и внутренних планируемых и непланируемых воздействий.

Под внешним понимается воздействие внешней среды, а под внутренним – воздействие одной части автоматической системы на другую.

Автоматическое управление объектом в соответствии с алгоритмом функционирования осуществляется планируемым воздействием. Величина, характеризующая планируемое входное воздействие, называется задающей величиной.

Величину, характеризующую планируемое выходное воздействие управляемого объекта, называют управляемой величиной.

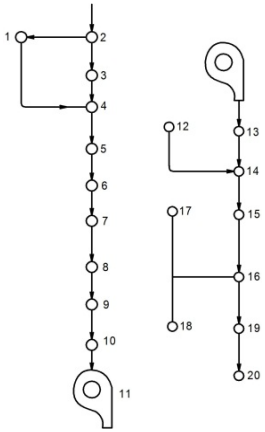



Рис. 5.1. Диаграмма последовательности операций при управлении насосным агрегатом с индивидуальным вакуум-насосом и задвижкой на напорном трубопроводе: *а* – пуск агрегата; *б* – нормальная и аварийная остановка агрегата; *1* – телеимпульс пуска; *2* – агрегат готов к пуску, горит зелёная лампа; *3* – пуск ключом или кнопкой; *4* – включается реле пуска, загорается красная лампа; *5* – включается вакуум-насос; *6* – насос залит, включается реле пуска двигателя основного насоса; *7* – включается двигатель основного насоса и отключается вакуум-насос; *8* – включается реле давления; *9* – включается задвижка в сторону «открыть»; *10* – задвижка открывается, отключается реле пуска, гаснет зелёная лампа; *11* – насосный агрегат в работе; *12* – телеимпульс остановки; *13* – остановка ключом или кнопкой; *14* – включается реле остановки, зажигается зелёная лампа; *15* – включается задвижка в сторону «закрыть»; *16* – закрывается задвижка, отключается реле пуска двигателя основного насоса; *17* – выходное реле защиты; *18* – зажигается жёлтая лампа; *19* – отключается двигатель основного насоса, отключается реле пуска, красная лампа гаснет; *20* – насосный агрегат отключен

По своей природе она может быть различной: механической, элек-

трической, тепловой, световой, акустической и т. д. Значение управляемой величины, предусмотренное алгоритмом функционирования, называется предписанным, а измеренное (фактическое) – действительным.

Непланируемым называют воздействие, которое не предусмотрено алгоритмом функционирования. Обычно непланируемое воздействие вызывает ухудшение или нарушение работы системы автоматического управления. Различают воздействие управляющего устройства на управляемый объект и, наоборот, воздействие управляемого объекта на управляющее устройство. В первом случае воздействие называется управляющим, а во втором – контрольным.

Передача воздействий от внешней среды к автоматической системе или от одной части системы к другой осуществляется по определенному пути, называемому цепью воздействия.

В основу классификации автоматических систем положен характер алгоритма функционирования и характер алгоритма управления.

В зависимости от алгоритма функционирования автоматические системы разделяются на три вида: стабилизирующие, программные и следящие.

В стабилизирующей системе алгоритм функционирования содержит предписание поддерживать управляемую величину постоянной. Стабилизирующая система в статическом режиме характеризуется уравнением:

$$y = C + \Delta(x), \tag{5.1}$$

где $C$ – постоянная, равная предписанному значению;

$y$ – управляемая величина;

$\Delta(x)$ – отклонение управляемой величины, зависящее от входного воздействия $x$.

Величину $\Delta(x)$ называют статической ошибкой. Для оценки величины отклонения служат коэффициент неравномерности:

$$\delta = \frac{y_{\text{макс}} - y_{\text{мин}}}{y_{\text{н}}} \tag{5.2}$$

и коэффициент статизма

$$k_{ст} = \frac{y_1 - y_2}{y_{\text{н}}} : \frac{x_1 - x_2}{x_{\text{н}}}, \tag{5.3}$$

где $x_н$ и $y_н$ – номинальные значения входной и выходной величин;

$y_1$ и $y_2$ – значения выходных величин, соответствующие входным величинам $x_1$ и $x_2$.

Начало процесса может обеспечиваться также соответствующими датчиками. Например, насосный агрегат включается, когда уровень воды в водозаборном сооружении достигает определенной величины, работает до тех пор, пока не откачает воду и не установится новый, заранее заданный режим, а затем отключается. Весь процесс протекает без участия человека.

Примером более сложного процесса является управление насосными станциями перекачки. В этом случае автоматические устройства решают логические задачи. На основе полученной информации они выбирают оптимальную комбинацию действующих агрегатов, чтобы при минимальном количестве переключений обеспечить режим канала и работу станции с оптимальным коэффициентом полезного действия.

Автоматический контроль применяется для сигнализации определенных, заранее установленных положений объектов или технологических параметров, а также для измерений контролируемых величин.

Как было показано, учет и контроль за водозабором и водораспределением является необходимым мероприятием для правильной эксплуатации оросительных систем.

## 5.2. Классификация автоматических систем

В современной технике используется большое количество разнообразных автоматических устройств и систем, отличающихся друг от друга физической природой, принципом действия, схемными и конструктивными решениями и т. д. Чтобы облегчить изучение и выбор автоматизированных производственных процессов, их необходимо классифицировать.

Классифицировать автоматические системы можно по назначению, характеру изменения управляющих воздействий, способу формирования сигналов, способу математического описания, виду контролируемых изменений своих свойств, роду используемой энергии и др.

Автоматические устройства и системы, как правило, предназначены для решения лишь нескольких основных задач автоматизации, к которым относятся: сигнализация, контроль, блокировка и защита, пуск и остановка, управление.

*Системы автоматической сигнализации* предназначены для извещения обслуживающего персонала о состоянии той или иной техниче-

ской установки или о протекании того или иного процесса.

*Системы автоматического контроля* осуществляют без участия человека контроль различных параметров и величин, характеризующих работу установки или протекание процесса.

*Системы автоматической блокировки и защиты* служат для предотвращения возможности возникновения аварийных ситуаций в технических агрегатах и устройствах.

*Системы автоматического пуска и остановки* обеспечивают включение, остановку (а иногда и реверс) различных двигателей и приводов по заранее заданной программе.

*Системы автоматического управления* предназначены для управления работой тех или иных технических агрегатов или протеканием каких-либо процессов без непосредственного участия человека.

*Системы автоматического регулирования* представляют собой частный случай систем автоматического управления.

*Автоматическим регулированием* называется изменение какой-либо физической величины по требуемому закону.

Физическая величина, подлежащая регулированию, называется обычно *регулируемой величиной*, а технический агрегат, в котором осуществляется автоматическое регулирование, – *регулируемым объектом*.

Управляемым процессом в этом случае является процесс изменения регулируемой величины во времени. Цель управления заключается в обеспечении требуемого закона изменения регулируемой величины.

Системы автоматического регулирования в зависимости от характера изменения управляющего воздействия делятся на три класса. Различают системы автоматической стабилизации, системы программного регулирования и следящие системы.

Системы автоматической стабилизации характеризуются тем, что в процессе работы системы управляющее воздействие остается величиной постоянной. Основная задача этой системы – поддержание на постоянном уровне с допустимой ошибкой регулируемой величины независимо от действующих возмущений.

Системы программного регулирования отличаются тем, что управляющее воздействие изменяется по заранее установленному закону в функции времени или в функции координат системы.

В следящих системах управляющее воздействие также является величиной переменной, но математическое описание его во времени не может быть установлено, так как источником сигнала служит внешнее явление, закон изменения которого заранее не известен.

В зависимости от способа формирования сигналов различают системы автоматического регулирования непрерывные, импульсные и релейные.

В непрерывных системах во всех элементах, составляющих систему, входные и выходные сигналы являются непрерывными функциями времени.

В импульсных системах с помощью специального устройства, называемого импульсным элементом, непрерывный сигнал квантуется по времени. При этом различают амплитудно-импульсную, широтно-импульсную и частотно-импульсную модуляции.

В релейных автоматических системах управляющее воздействие изменяется скачком всякий раз, когда управляющий сигнал проходит через некоторые фиксированные пороговые значения.

По способу математического описания, принятого при исследовании, выделяют линейные и нелинейные системы.

По виду контролируемых изменений своих свойств различают неприспосабливающиеся и приспосабливающиеся (адаптивные) системы. В последнем классе можно выделить самонастраивающиеся системы с самонастройкой параметров или воздействий и самоорганизующиеся системы с контролируемыми изменениями структуры.

В зависимости от рода используемой энергии различают электрические, гидравлические, пневматические, электромеханические, электропневматические, электрогидравлические и другие регуляторы.

К достоинствам электрических регуляторов относятся: компактность, небольшие масса и габариты, возможность применения в схемах регуляторов стандартных электро- и радиоэлементов, широкие возможности по усилению и преобразованию сигналов, возможность управления на больших расстояниях при помощи передачи сигналов по проводным и радиотехническим линиям связи.

Основной недостаток электрических регуляторов – громоздкость и сложность исполнительных элементов электрического типа в тех случаях, когда требуется получение большого крутящего момента при малых скоростях вращения и высоком быстродействии. Для монтажа, наладки и обслуживания электрических и, особенно, электронных регуляторов требуется персонал высокой квалификации. Электрические регуляторы применяют на гидротехнических сооружениях магистральных и межхозяйственных каналов.

Оснастить электроэнергией водовыпуски внутрихозяйственной сети трудно, поэтому в настоящее время здесь применяют автоматические регуляторы гидравлического действия. Важнейшие достоинства

гидравлических регуляторов – высокая надежность работы и хорошие динамические свойства гидравлических исполнительных механизмов, развивающие значительные усилия и моменты при высоком быстродействии.

В отечественной и зарубежной практике используют сотни различных автоматических регуляторов гидравлического действия. Некоторые из них могут быть применены на гидротехнических сооружениях для осуществления местной автоматики. При наличии обратной гидравлической связи между объектами, в данном случае между сооружениями, средства местной автоматики обеспечивают автоматическое регулирование на мелиоративных системах или отдельных звеньях. Регуляторы гидравлического действия обеспечивают надежную работу системы во всех эксплуатационных режимах.

Средства гидравлической автоматики представляют собой различного типа регуляторы, использующие энергию перепадов или напоров для автоматической стабилизации уровней, расходов, перепадов, давлений. К средствам гидравлической автоматики можно отнести также конструкции сооружений, обеспечивающие автоматизацию их работы без применения каких-либо автоматических регуляторов.

Все средства гидравлической автоматики для оснащения мелиоративных гидротехнических сооружений можно разделить на четыре группы:

– регуляторы уровней в каналах открытой сети: верхнего, нижнего бьефа, смешанного типа, гидравлических перепадов, водосливные пороги и затворы, водосливные сифоны;

– регуляторы расходов в открытой сети: регуляторы расхода, пропорциональные делители;

– регуляторы напоров в закрытой сети: регуляторы напоров в трубопроводах, регуляторы уровней на водовыпусках в закрытую сеть, регуляторы уровня грунтовых вод;

– автоматические задвижки на закрытой сети: задвижки и клапаны для стационарных систем; то же для стабилизации напоров и аварийного отключения.

## 5.3. Типы систем автоматического регулирования

Свойства систем автоматического регулирования в значительной степени определяются тем, какая форма придается сигналу управления, воздействующему на исполнительное устройство. Рассмотрим основные способы формирования сигнала управления в регуляторах.

1. *Непрерывной* называется такая система автоматического регулирования, в которой непрерывному изменению регулируемой величины соответствует непрерывное изменение параметров во всех звеньях системы. Для этого все элементы системы должны обладать непрерывными характеристиками. В этом случае сигнал управления принимает любые промежуточные положения в пределах его изменения от минимума до максимума. Очевидно, система регулирования уровня воды в баке является непрерывной (рис. 5.2).

2. *Релейной* называется система автоматического регулирования, имеющая в своем составе среди основных элементов хотя бы один релейный элемент, т. е. элемент, в котором непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное изменение выходной величины, принимающей фиксированные значения. При этом выходная величина появляется лишь при определенных значениях входной величины.

Релейные системы нашли преимущественное распространение при автоматизации процесса маневрирования затворами.

3. *Системами прерывистого действия* называются системы автоматического регулирования, имеющие в своем составе специальное устройство для периодического размыкания цепи автоматического регулирования. Часто в этих системах используют релейные элементы, в этом случае говорят об импульсных системах.

В системах прерывистого действия цепь системы автоматического регулирования непрерывного действия размыкается через равные промежутки времени специальным устройством; при этом длительность всех импульсов одинакова, а их величина и форма меняются в зависимости от величины и формы входной величины x. В отличие от систем прерывистого действия в импульсных системах величина импульса на выходе остается неизменной по величине благодаря наличию релейного элемента; длительность импульса может быть неизменной или пропорциональной входной величине x, в зависимости от конструктивного исполнения.

Соответственно этому и регуляторы называются либо импульсными, либо пропорционально-импульсными.

Кроме того, наряду с пропорционально-импульсными системами, в которых длительность цикла регулирования $T_ц$ постоянна, существуют регуляторы, в которых остается постоянной пауза, независимо от продолжительности импульса, и, следовательно, $T_ц \neq \text{const}$.

На рис. 5.2 приведены формы сигналов управления в системах непрерывного, прерывистого и импульсного действия.

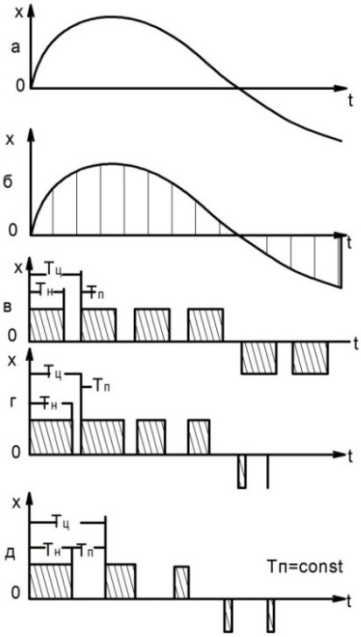



Рис. 5.2. Формы сигналов управления в системах автоматического регулирования: *а* – непрерывного действия; *б* – прерывистого действия; *в* – импульсного действия; *г* – пропорционально-импульсного действия: $T_ц \neq$ const; *д* – пропорционально-импульсного действия: $T_п$ = const; $T_ц$ – продолжительность цикла регулирования; $T_и$ – продолжительность импульса; $T_п$ – продолжительность паузы

В мелиоративных системах для регулирования уровней и расходов воды в открытых каналах применяются как импульсные, так и пропорционально-импульсные регуляторы с переменным $T_ц$.

## 5.4. Три основных класса систем автоматического регулирования

В зависимости от способа формирования задания различают три основных класса систем автоматического регулирования: автоматической стабилизации; программного регулирования; следящие.

Мы рассмотрели структуру системы автоматического регулирования с одной регулируемой величиной (уровень в канале). В ней управляющее воздействие представляет собой величину, которую необходимо поддерживать неизменной. Такие системы называются системами автоматической стабилизации.

В тех случаях, когда регулируемая величина должна изменяться во времени по заранее известному закону, уставка задатчика регулятора не остается неизменной (как в случае систем автоматической стабилизации), а изменяется по заданному закону. Изменение осуществляется специальным задатчиком, например кулачковым механизмом, приводимым в движение синхронным двигателем. Такие системы называются системами автоматического программного регулирования. Третий класс представляют следящие системы. В них задание также не остается неизменным. Но вследствие того, что закон изменения регулируемой величины заранее неизвестен, исполнительный механизм воспроизводит с минимальной ошибкой движение, задаваемое ему (по любому закону) каким-либо командным механизмом. Следящий электропривод имеет широкое распространение в технике автоматического регулирования; в частности, для изменения положения затворов и уставки их с диспетчерского пункта в любое промежуточное положение используется принцип следящей системы.

Распространены также более сложные, смешанные системы, в которых имеются различные сочетания систем стабилизации, программного регулирования и слежения.

## 5.5. Принципы автоматизации инженерных систем

Управление производственным процессом или объектом сводится к получению, передаче, обработке и использованию информации. В управляемой системе информация постоянно или периодически циркулирует по замкнутой цепи. Если в ней принимает участие человек, то система управления называется автоматизированной. При этом степень ее автоматизации определяется степенью участия человека.

Структура системы автоматического управления показана на рис. 5.3. В зависимости от сложности объекта управления в схеме могут меняться лишь технические средства реализации указанных операций, но их функции остаются неизменными. Например, как устройство обработки информации и формирования команд управления в автоматической системе управления оросительной системой используется ЭВМ, а в системе регулирования уровня воды в бьефе канала – нуль-

орган. Устройство передачи рабочей информации может выполняться в виде системы телемеханики, электрического кабеля или трубки, наполненной водой и т. д.

Рис. 5.3. Структура системы автоматического управления

Работа систем автоматического управления основана на использовании определенных принципов управления. Они обусловливаются видом рабочей информации, на основе которой формируется управляющее воздействие. Наиболее универсален и эффективен принцип управления по отклонению. Согласно ему управляющее воздействие формируется как разность заданного и фактического значения регулируемой величины, измеренного устройством получения информации. Система получается замкнутой и называется системой с обратной связью.

Принцип управления по возмущению заключается в том, что управляющее воздействие в системе вырабатывается на основе измерения возмущения, действующего на объект.

Системы управления по отклонению обладают тем преимуществом, что управляющее воздействие формируется независимо от причин, вызвавших отклонение регулируемой величины от заданного значения, т. е. система реагирует на следствие, а не на причину, что вно-

сит определенное запаздывание. В системе управления по возмущению управляющее воздействие формируется без запаздывания по отношению к моменту возникновения возмущения до изменения регулируемого параметра на величину, измеряемую измерительным устройством.

При действии на объект многих возмущающих факторов система управления строится по принципу компенсации одного или двух существенных возмущений.

Если соединить в одной системе оба принципа, то получим систему комбинированного управления, обладающую положительными качествами обоих принципов (например, система регулирования режима канала по уровню и расходу воды). Комбинированные системы управления более быстродейственны и точны, а по отношению к основным возмущениям их можно выполнить инвариантными.

Для проектирования рассмотренных систем необходимо знать закон изменения регулируемой величины. Если этот закон неизвестен, а только задается критерий качества работы, то применяют систему управления с адаптацией.

Система автоматического управления с адаптацией имеет дополнительные устройства поиска критерия качества и изменения регулируемых величин. Поиск численного значения критерия качества она выполняет на основе дополнительных экспериментов (оптимальные системы) или моделированием технологического процесса.

## 5.6. Основные сведения по составлению схем автоматики

Схема является главным документом, поясняющим принцип действия и взаимодействия различных элементов, устройств или в целом систем автоматики. В зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав автоматической установки, схемы разделяют на электрические, гидравлические, пневматические и кинематические, которые обозначаются соответствующими буквами: *Э, Г, П* и *К*.

В соответствии с назначением схемы подразделяют на следующие типы: принципиальные, соединения (монтажные), подключения, функциональные и структурные. Наименование схемы определяется ее видом и типом, например, схема электрическая принципиальная или схема гидравлическая.

Схемы вычерчивают без соблюдения масштаба и часто без учета действительного пространственного расположения составных элементов установки. Они должны быть выполнены четко и компактно, но

без ущерба для ясности и удобства чтения. При этом необходимо стремиться к минимальному числу пересечений и изломов линий. Для сложных установок схема может быть изображена на нескольких листах. Линии, которые показывают связь элементов, расположенных на отдельных листах, обрывают за пределами изображения схемы. Около места обрыва наносят условные обозначения одними и теми же буквами или цифрами, по которым легко определяются связи и продолжения линий на других листах.

Принципиальные электрические схемы иллюстрируют порядок соединения между собой отдельных элементов установки. На них изображают все элементы и все связи между ними, которые показывают входные и выходные цепи. Схемы вычерчивают для положения установок в отключенном состоянии. Другими словами, изображение элементов должно соответствовать обесточенному состоянию всех цепей схемы и отсутствию внешних механических воздействий на аппаратуру.

Для удобства чтения схема должна быть логически последовательной и читаться слева направо или сверху вниз.

Условные графические обозначения элементов вычерчивают в горизонтальном или вертикальном положении, а в отдельных случаях допускается обозначение поворачивать на угол, кратный 45°.

При больших форматах для облегчения нахождения элементов сложные схемы разбивают на отдельные зоны, которые указывают в перечне элементов. Если на одной схеме изображают различные по функциональному назначению цепи, то их вычерчивают линиями разной толщины (от 0,2 до 1 мм).

Каждому элементу схемы присваивают буквенное или цифровое позиционное обозначение. Буквенное обозначение обычно представляет собой сокращенное наименование элементов, например: *РВ* – реле времени, $T_p$ – трансформатор, *МП* – магнитный пускатель. Цифровые номера следуют в порядке их возрастания, начиная с единицы, например, *РВ1*, *РВ2* и т. д., *R1*, *R2* и т. д. Последовательность номеров соответствует последовательному расположению на схеме основных элементов, считая слева направо или сверху вниз. При необходимости раздельно изображенные части элементов соединяют линией, указывающей на принадлежность их к одному конструктивному элементу. К сложной схеме, как правило, дается перечень элементов, в котором приведены основные данные об элементах.

Номиналы резисторов от 0 до 999 Ом на схемах пишутся без указания единицы измерения, от 1 до 999 Ом – с обозначением единицы измерения буквой «к», а свыше 1 МОм – буквой «М». Для конденсато-

ров емкость в пикофарадах записывают числом без указания единицы измерения, а в микрофарадах емкость записывают в виде дробных величин или целым числом, проставляя после него через запятую знак нуль, например 0,02; 0,2; 20,0.

Если параметры резисторов, конденсаторов и других элементов выбираются при наладке изделия, то в позиционных обозначениях таких элементов на схеме проставляют звездочки, например *R2*, C4**.

Различают совмещенные и разнесенные (развернутые) принципиальные схемы.

На совмещенной схеме составные части элементов изображают совместно в непосредственной связи друг с другом и каждый элемент обозначают своим условным символом. Связь между отдельными элементами показывают линиями, идущими от одного элемента к другому. Преимущество совмещенных схем заключается в их наглядности, простоте чтения при небольшом количестве межэлементных связей.

На разнесенной схеме условные обозначения составных частей элементов изображают в разных местах схемы. Обычно последовательность соединения отдельных элементов аппаратуры показывают по цепи протекания тока от плюса к минусу или от одной фазы к другой. Элементы, входящие в одну цепь, изображают последовательно друг за другом по прямой, а отдельные цепи – одну под другой в виде параллельных горизонтальных или вертикальных строк (строчным способом). Схемы этого типа выполняют отдельно по цепям постоянного напряжения, переменного напряжения или переменного тока. Для облегчения нахождения элементов параллельные строки нумеруют последовательно возрастающими порядковыми цифрами. В ряде случаев в схемах постоянного тока начало цепей положительной полярности нумеруют нечетными цифрами, а отрицательной полярности – четными. На свободном поле рядом со схемой часто помещают разъяснение условного шифра элемента или его функционального назначения и основные технические данные.

Разнесенные схемы отличают простота изображения и наглядность взаимодействия элементов, возможность быстрого обнаружения обрывов и обходных ложных цепей.

Схема соединений изображает либо внешние соединения между отдельными узлами устройства, либо соединения между элементами внутри устройства. Схему, показывающую внешние подключения установки, называют *схемой подключения*. Такие схемы служат рабочими чертежами, по которым делают монтаж аппаратуры, поэтому их еще называют *монтажными*.

Для правильного соединения проводов при монтаже и для облегчения эксплуатации на схеме соединений изображают все элементы с их входными и выходными зажимами или разъемами, к которым присоединяются провода, а также показывают связи между элементами. Для упрощения схемы провода, идущие в одном направлении, объединяют в одну общую линию, а при подходе к зажимам каждый провод показывают отдельно. Элементы вычерчивают в различной форме: в виде прямоугольника или в условном графическом обозначении, а иногда в форме внешних очертаний прибора. Внутри или около изображения элемента указывают его наименование или тип, а на входных и выходных клеммах – определенную маркировку. Маркировка состоит из букв и цифр и в условном виде обозначает функциональное назначение и характеризует положение проводов и аппаратов в схеме. Она показывает, откуда приходит провод и куда подключается. Поэтому маркируют оба конца провода и переносят это обозначение на схему. Номера кабелей проставляют на схеме в окружностях вблизи от мест разветвления жил. На электрической схеме иногда указывают марки, сечения и расцветку проводов, если они не обозначены в других конструкторских документах к данной установке.

При автоматизации мобильных сельскохозяйственных машин и стационарных механизмов наряду с электрическими часто приходится иметь дело с кинематическими, гидравлическими и пневматическими схемами, на которых изображают соответственно кинематические элементы (шестерни, звездочки, шкивы, кулачки) и их механические и немеханические соединения (валы, стержни, шатуны, оси и т. п.), гидравлические и пневматические приводы, системы охлаждения и смазки, топливные системы, системы газо- и водоснабжения и др.

## 5.7. Функциональные и структурные схемы автоматики

Функциональные и структурные схемы, в построении (но не в назначении) которых много общего, широко используются при изучении теории систем автоматики.

Функциональные схемы (функциональные структуры) автоматики отражают взаимодействие устройств, блоков, узлов и отдельных элементов в процессе их работы в совокупности с системой управления. Графически отдельные узлы или элементы автоматики изображают прямоугольниками, а существующие между ними связи – стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала.

Рассмотрим функциональные схемы автоматических систем управ-

ления с регуляторами прямого и непрямого действия. Принципиальное различие их в том, что работа исполнительного органа у регулятора прямого действия осуществляется за счет энергии воспринимающего органа (датчика), а у регулятора непрямого действия – за счет энергии вспомогательного источника.

Функциональная схема системы с регулятором прямого действия (рис. 5.4, *а*) состоит из управляемого объекта *УО*, воспринимающего органа *ВО*, сравнивающего органа *СО* и исполнительного органа *ИО*. Последние три органа совместно образуют устройство, которое представляет собой регулятор *Р* прямого действия (обведен пунктиром). Сравнивающий орган принято обозначать не прямоугольником, а кружком с секторами. На управляемый объект, находящийся под влиянием возмущающего воздействия *N(t),* поступает от регулятора управляющее воздействие $x_p$, противоположное по знаку отклонению управляемого параметра *y* от заданного значения. Запись воздействия *N(t)* отражает то обстоятельство, что оно может изменяться во времени *t*. Воспринимающий орган замеряет управляемый параметр и преобразует его в сигнал $x_1$, удобный для сопоставления с заданным значением $x_0$ управляемого параметра в сравнивающем органе *СО*, который является также задатчиком и служит для настройки регулятора на поддержание заданного значения управляемого параметра. Его выполняют часто как самостоятельный элемент, а иногда вводят в структуру воспринимающего органа (датчика).

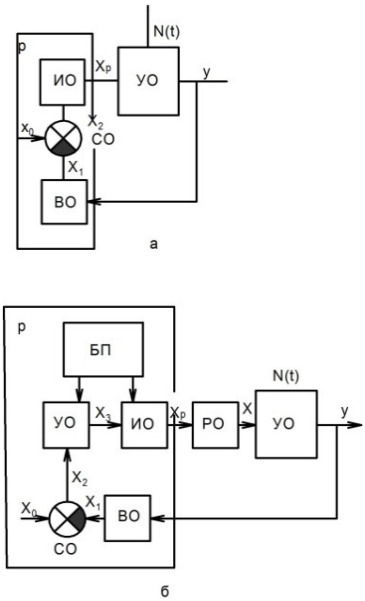



Рис. 5.4. Функциональные схемы автоматической системы управления: *а* – с регулятором прямого действия; *б* – с регулятором непрямого действия

С выхода *СО* сигнал $x_2$, равный разности сигналов $x_1$ и $x_0$, поступает на исполнительный орган *ИО*, который посредством сигнала $x_р$ воздействует на объект в соответствии с отклонением регулируемого параметра.

У регулятора непрямого дей-

ствия (рис. 5.4, *б*) сигнал $x_2$ со сравнивающего органа поступает на усилительный орган *УО*, где происходит его значительное усиление за счет энергии специального блока питания *БП*. Усиленный сигнал $x_3$ управляет исполнительным органом *ИО*, который передает воздействие $x_р$ на управляемый объект за счет энергии, получаемой также от блока питания *БП*. В ряде случаев целесообразно из управляемого объекта выделять ту часть устройства, при помощи которой осуществляется непосредственное управление параметром. Эту часть называют регулирующим органом *РО*. Аналогично строят функциональные схемы более сложных систем автоматического управления, примеры которых рассмотрены в следующих разделах.

Структурные схемы показывают взаимосвязь составных частей автоматических систем управления (АСУ) и характеризуют их динамические свойства. Это наиболее удобная графическая форма представления АСУ при исследовании ее динамических свойств, когда отвлекаются от конкретной физической природы регулируемой величины, вида и конструкции аппаратуры, а на схеме изображают лишь математическую модель процесса регулирования.

Исследуемую систему разделяют на части – элементарные звенья направленного действия, передающие сигналы только в одном направлении: от входа к выходу. Связь между звеньями показывают линиями со стрелками, характеризующими направленность взаимодействия звеньев. Разделяют АСУ на звенья в зависимости от вида математического уравнения, связывающего выходную величину с входной каждого звена. На структурной схеме элементы регулятора и управляемого объекта, как и на функциональной схеме, изображают в виде прямоугольника, причем может быть представлено какое-либо одно устройство.

# 6. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

## 6.1. Разработка конструкторской документации

Проектирование схем автоматизации выполняют в строгом соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Порядок разработки проектной и конструкторской документации регламентирован ГОСТ 2.103-85 ЕСКД «Стадии разработки». В этом стандарте установлены основные стадии разработки конструкторской документации, единая терминология, требования к содержанию и необходимый объем работ, выполняемых на каждой стадии.

На базе указанного стандарта были разработаны ГОСТы: «ЕСКД. Техническое предложение», «ЕСКД. Эскизный проект», «ЕСКД. Технический проект», которые способствовали совершенствованию организации конструкторских работ на проектных стадиях, существенному повышению производительности труда разработчиков, улучшению качественных и технико-экономических показателей систем автоматизации.

Предусматриваются четыре основные стадии разработки конструкторской документации: техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация.

*Техническое предложение* – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования (ТЭО) целесообразности разработки документации на основе анализа технического задания заказчика различных вариантов возможных решений с учетом аппаратурных и эксплуатационных особенностей создаваемой и известных систем автоматизации, а также результатов патентного поиска. Техническое предложение после согласования и утверждения установленном порядке является основанием для разработки эскизного и технического проектов.

*Эскизный проект* – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы системы автоматизации, а также данные, определяющие назначение отдельных элементов разрабатываемой системы. Эскизный проект после согласования и утверждения является основанием для разработки технического проекта или рабочей документации.

*Технический проект* – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве системы, и исходные данные для разработки рабочей документации. Технический проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки рабочей документации.

*Рабочая документация* включает корректировку конструкторских документов по результатам изготовления головного (контрольного) варианта проекта системы. Основные требования к изготовлению рабочих чертежей предусматривают оптимальное применение стандартных и покупных технических средств автоматизации, а также серийных средств, освоенных производством и соответствующих современному уровню автоматизации; рационально ограниченную номенклатуру марок и сортаментов материалов, а также применение наиболее

дешевых и наименее дефицитных материалов; необходимую степень взаимозаменяемости, наивыгоднейшие способы монтажа, наладки и ремонта технических средств автоматизации, а также их максимальное удобство при обслуживании и эксплуатации.

## 6.2. Графическое оформление схем автоматизации

Основным техническим документом, показывающим связи между инженерной системой (технологическим процессом) и средствами контроля и управления, является функциональная схема автоматизации, на которой с помощью условных изображений схематически показывают технологическое оборудование, трубопроводы и средства автоматизации.

Технологическое оборудование и трубопроводы автоматизируемого объекта изображают на функциональной схеме упрощенно. Направление движения потоков в трубопроводах указывают стрелками. На линиях обрыва также ставят указывающие стрелки и дают необходимые пояснения, из какого аппарата и к какому направляется данный поток.

Условные обозначения средств автоматизации на функциональных схемах элементов измерительной цепи, регуляторов и станций управления, а также исполнительных механизмов приведены в табл. 6.1. В верхнюю половину окружности, обозначающей элемент измерительной цепи или регулятор, сначала записывают значения измеряемых или регулируемых параметров (табл. 6.2), а затем – обозначения основных функций, выполняемых этим устройством (табл. 6.3).

Таблица 6.1. **Условные обозначения средств автоматизации**

| № п/п | Наименование | Обозначение |
|---|---|---|
| 1 | Датчик, промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, магнитный или теристорный пускатель и другие устройства, установленные на аппарате, трубопроводе или около них | |
| 2 | Промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, кнопка, переключатель и другие устройства, установленные на щите управления | |
| 3 | Исполнительный механизм (пневматический, электрический) | |

Таблица 6.2. **Условные обозначения параметров**

| Название | Обозначение | Название | Обозначение |
|---|---|---|---|
| Давление, разряжение | *P* | Влажность | *M* |
| Уровень | *L* | Состав, концетрация | *Q* |
| Расход | *F* | Несколько разнородных параметров | *U* |
| Температура | *T* | Электрическая величина | *E* |
| Плотность | *D* | Время | *K* |
| Вязкозть | *V* | Положение, перемещение | *G* |

Таблица 6.3. **Условные обозначения основных функций средств автоматизации**

| Название | Обозначе-ние |
|---|---|
| Показание | *I* |
| Регистрация | *R* |
| Регулировка, управление | *C* |
| Дистанционное управление с помощью устройства, встроенного в измерительный прибор (например, станции управления) | *K* |
| Дистанционное управление с помощью отдельного (не встроенного в измерительный прибор или регулятор) устройства, (например, кнопкой, ключом управления, задатчиком) | *H* |
| Преобразование измеряемого параметра (выходной сигнал датчика) | *E* |
| Дистанционная передача показаний | *T* |
| Преобразование сигнала (например, пневматического в электрический), выполнение вычислительных функций (например, извлечение корня) | *Y* |
| Сигнализация | *A* |
| Включение, выключение, переключение | *S* |

На рис. 6.1 приведен пример функциональной схемы автоматизации нагрева паром воды в парожидкостном теплообменнике. Как видно из приведенной схемы, она содержит один контур регулирования – температуры воды *(5а – 5е)*. Остальные устройства предназначены для измерения расхода пара *(1а – 1в),* расхода воды *(4а – 4б),* температуры воды и пара на входе в теплообменник *(3а – 3в)*. Кроме того, предусмотрена сигнализация при падении давления пара *(2)*.

Расположение элементов автоматизации на функциональной схеме определяется их значением. Условные обозначения датчиков, промежуточных преобразователей, объединенных с датчиками в одно устройство, и исполнительных механизмов, т. е. всех элементов АР, механически связанных с технологическими аппаратами Г и трубопроводами, помещают рядом с изображением соответствующего оборудования *(1а, 3а, 3б, 4а, 5а, 5е)*. Более того, условные обозначения датчиков и промежуточных преобразователей расходомеров, через которые проходят технологические потоки, размещают прямо на изображениях трубопроводов, в которых измеряются расходы *(1а* и *4а)*. Всю остальную аппаратуру автоматизации: преобразователи, измери-

тельные приборы, регуляторы и органы управления – выносят в нижнюю часть схемы. При этом вдоль листа вычерчивают прямоугольники, условно изображающие щиты и пульты. В этих прямоугольниках группируют аппаратуру по принципу общности расположения. Например, все преобразователи и приборы, расположенные рядом с местом измерения, т. е. смонтированные не на оборудовании, а на стенах здания, колоннах, на полу и т. п., располагают в одном прямоугольнике *(1б*, 2). В другом прямоугольнике расположены условные обозначения аппаратуры автоматизации, размещенной на щите управления процессом *(1в, 3в, 4б, 5б, 5в, 5г, 5д)*.

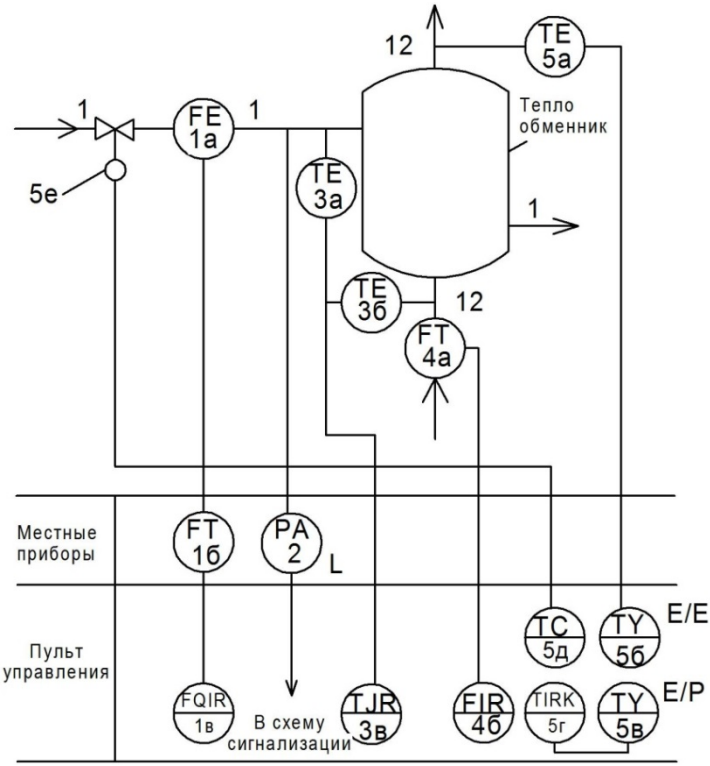



Рис. 6.1. Функциональная схема автоматизации процесса нагревания

Поскольку функциональная схема автоматизации предназначена для отражения только структуры системы управления, в ней не расшифровываются технические средства, использованные конкретной

схеме. Поэтому, например, в АСР температуры воды датчиком температуры *(5а)* может быть термопара или термометр сопротивления. Тогда следующим преобразователем *(5б)* в первом случае будет нормирующий преобразователь ЭДС в ток (типа. НП-ТЛ-1М), а во втором – электрического сопротивления в ток (типа НП-СЛ-1М). Нельзя определить по функциональной схеме также систему дистанционной передачи сигналов. Например, если для измерения расхода воды использовали ротаметр *(4а)* с электрической дистанционной передачей (типа РЭД), то измерительным прибором *(4б)* будет прибор для измерения напряжения переменного тока (типа КСД); с ротаметром, имеющим пневматическую дистанционную передачу (типа РПД), используют прибор для измерения давления сжатого воздуха (типа ПВ). То же относится ж средствам регулирования, сигнализации и т. п.

Расшифровка элементов автоматизации, изображенной на функциональной схеме, имеется в спецификации, которая составляется для заказа этой аппаратуры на заводах-изготовителях. В этой спецификации по каждой позиции указываются тип устройства, его модификация, пределы измерения, требуемое количество и другие необходимые сведения.

## 6.3. Сигнализация, защита и блокировка

Устройство сигнализации предназначено для извещения обслуживающего персонала о состоянии контролируемых объектов. Сигнализация может быть световая и звуковая. *Световая* сигнализация подается с помощью сигнальных ламп с различным режимом свечения (ровный или мигающий свет, полный или неполный накал) или световыми указателями различного цвета. *Звуковая* сигнализация подается звонками, сиренами или гудками. Часто применяют сочетание световой и звуковой сигнализации. В таких случаях звуковой сигнал служит для извещения диспетчера или оператора о возникновении аварийного режима, а световой – указывает на место возникновения характера этого режима. Различают также технологическую и контрольную сигнализацию.

*Технологическая* сигнализация извещает о нарушении нормального хода технологического процесса, что проявляется в отклонении от заданного значения технических параметров: температуры, давления, уровня, расхода и т. п. В зданиях и сооружениях, где возможно появление в помещениях паров пожаро- и взрывоопасных веществ, а также токсических продуктов, срабатывает сигнализация повышения пре-

дельно допустимых концентраций таких веществ. Технологическая сигнализация бывает двух видов: предупредительная и аварийная. *Предупредительная* сигнализация извещает о больших, но еще допустимых отклонениях параметров процесса от заданных. При появлении сигналов предупредительной сигнализации оператор должен принять меры для устранения возникающих неисправностей. Аварийная сигнализация извещает о недопустимых отклонениях параметров процесса от регламентного или внезапного отключения какого-либо инженерного оборудования. Аварийная сигнализация требует немедленных действий оператора по заранее составленной инструкции. Поэтому такая сигнализация подается мигающим светом и резким звуком. Схемы аварийной сигнализации обычно снабжают кнопкой отключения (съема) звукового сигнала. При поступлении нового аварийного сигнала звуковая сигнализация включается снова. Иногда применяют схемы без повторения звукового сигнала. Такие схемы используются, когда появление хотя бы одного из аварийных сигналов автоматически вызывает остановку всей инженерной системы. На рис. 6.2 приведена схема электрической сигнализации двух технологических параметров.

При отклонении от нормы одного из них, например, первого, замыкается технологический контакт S1, расположенный в соответствующем измерительном приборе или сигнализаторе. При этом включается реле 1К, которое своим переключающим контактом 1К1 включает сигнальную лампу HL1 и отключает ее от кнопки опробования сигнализации SB3. Одновременно замыкающий контакт 1К2 реле 1К через размыкающий контакт ЗК2 выключенного реле ЗК включает звонок НА. Включается звонок кнопкой съема звуковой сигнализации SB1, при нажатии которой реле ЗК через свой замыкающий контакт ЗК1 становится на самоблокировку, размыкающим контактом отключается звонок.

Если при таком состоянии схемы замыкается второй технологический контакт S2, то при снятом звуковом сигнале загорается лишь сигнальная лампа HL2, а звуковой сигнал не будет подан. В исходное состояние схема придет после размыкания обоих технологических контактов S1 и S2, что вызывает отключение всех реле. Кнопки SB2 и SB3 предназначены для опробования звонка и сигнальных ламп.

*Контрольная* сигнализация извещает о состоянии контролируемых объектов: открыты или закрыты регулирующие органы, включены или отключены насосы, вентиляторы и т. п. Наиболее просто контрольная сигнализация выполняется для устройств, имеющих только два рабочих положения: открыто-закрыто или включено-отключено.

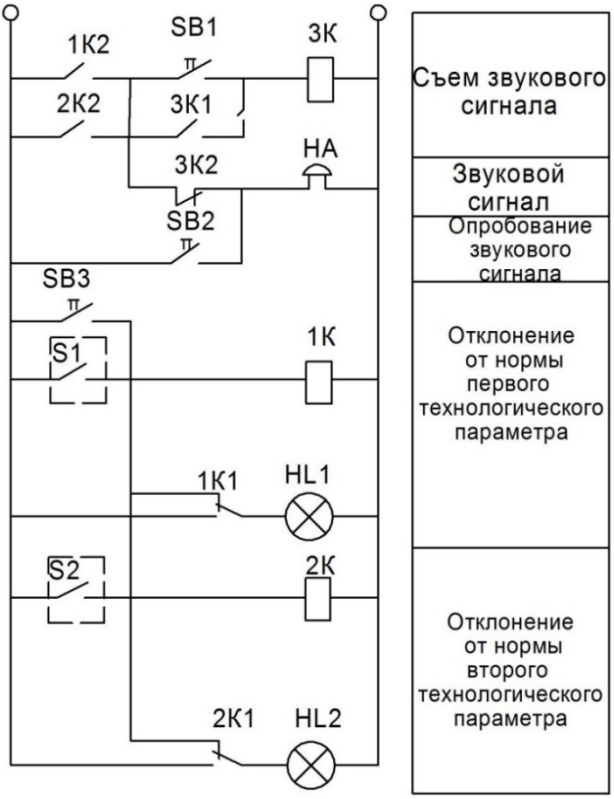



Рис. 6.2. Схема электрической сигнализации двух технологических параметров

Следует иметь в виду, что контрольная сигнализация иногда может выдать неверную информацию. Например, если для сигнализации о работе насоса используют блок-контакты магнитного пускателя, то такая схема будет информировать о включенном насосе даже в том случае, когда он неисправен или закрыт запорный клапан на нагнетании. Поэтому в таких случаях необходимо обращать внимание на показания приборов, подтверждающих достоверность полученной информации. Таким прибором может быть, например, расходомер на линии нагнетания или манометр, установленный за запорным органом. Устройства *автоматической защиты* предназначены для предотвра-

щения аварий в зданиях, где изменение условий работы инженерных систем может привести к возникновению аварийной ситуации. К числу таких потенциально опасных относятся системы, работающие в условиях интенсивного тепловыделения, при больших давлениях и температурах и т. п. Устройства автоматической защиты в подобных системах должны реагировать на нарушение нормального режима таким образом, чтобы предаварийное состояние не перешло в аварийное. Для этого обычно проводят защитные мероприятия: снижение давления, включение резервных насосов, отключение подачи топлива и т. д.

Некоторые защитные мероприятия, особенно в процессах, где авария может привести к тяжелым последствиям, предусматривают полную остановку оборудования, например посредством сброса воды из емкостей. Поскольку последующие пуск и наладка инженерной системы – задача сложная, необходимо исключить ложное срабатывание устройств автоматической защиты. Это достигается установкой двух отдельных устройств защиты, реагирующих на один и тот же признак опасности. Устройства защиты соединены так, чтобы исполнительный механизм защитного устройства включался только при их одновременном срабатывании.

Примером повсеместно применяемой системы автоматической защиты может служить схема управления электродвигателем (рис. 6.3). Схема работает следующим образом. При включении пусковой кнопки SB1 замыкается цепь питания обмотки магнитного пускателя КМ. Своими силовыми контактами КМ2 магнитный пускатель включает электродвигатель, а блок-контактом КМ1 шунтирует пусковую кнопку. После этого кнопку можно отпустить, а цепь питания обмотки магнитного пускателя останется замкнутой через его блок-контакт КМ1. Отключают двигатель нажатием кнопки «Стоп» SB2. При этом разрывается цепь питания обмотки пускателя и размыкаются его контакты КМ1 и КМ2. После отпускания кнопки SB2 обмотка магнитного пускателя остается обесточенной. В этой схеме предусмотрено действие защиты в трех возможных аварийных ситуациях: при исчезновении напряжения в сети, перегрузках и при коротких замыканиях.

При исчезновении напряжения в сети, например при отключении подачи электроэнергии, происходят отключение магнитного пускателя и остановка электродвигателя. Блок-контакт КМ1 обеспечивает защиту электродвигателя от самопроизвольного повторного включения при возобновлении подачи электроэнергии. Повторный пуск двигателя возможен только после нажатия пусковой кнопки SB1.

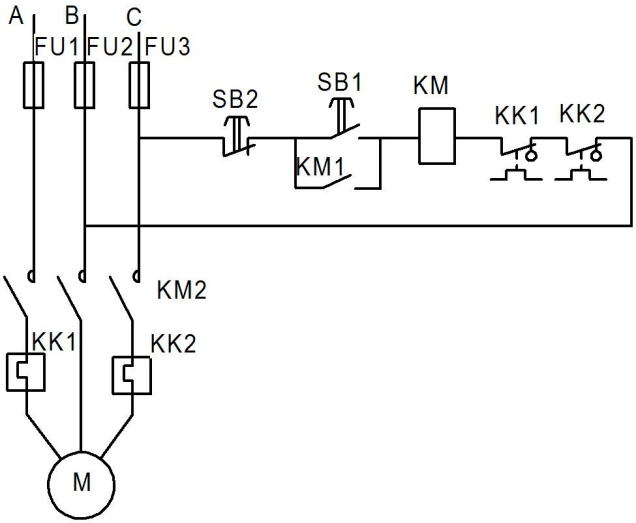


Рис. 6.3. Схема управления электродвигателем

Защита электродвигателя от перегрузок осуществляется тепловыми реле К.К.1 и К.К2, нагревательные элементы которых включены в две фазы питания электродвигателя, а размыкающие контакты – в цепь питания обмотки магнитного пускателя. Для нового пуска электродвигателя, отключенного тепловым реле, необходимо сначала вручную нажать кнопку, замыкающую контакты теплового реле. Защита электродвигателя и цепи магнитного пускателя от коротких замыканий выполняется предохранителями FU1, FU2 и FU3.

*Блокировка* служит для предотвращения неправильной последовательности включений и выключений механизмов, машин и аппаратов. На рис. 6.4 приведена схема управления реверсивным электродвигателем.

Эта схема исключает возможность одновременного срабатывания магнитных пускателей «Вперед» 1КМ и «Назад» 2КМ, так как при этом через силовые контакты обоих пускателей происходит короткое замыкание двух фаз питания. Такая блокировка обеспечивается введением нормально замкнутых блок-контактов 2КМЗ и 1КМЗ в цепи обмоток магнитных пускателей 1КМ и 2КМ.

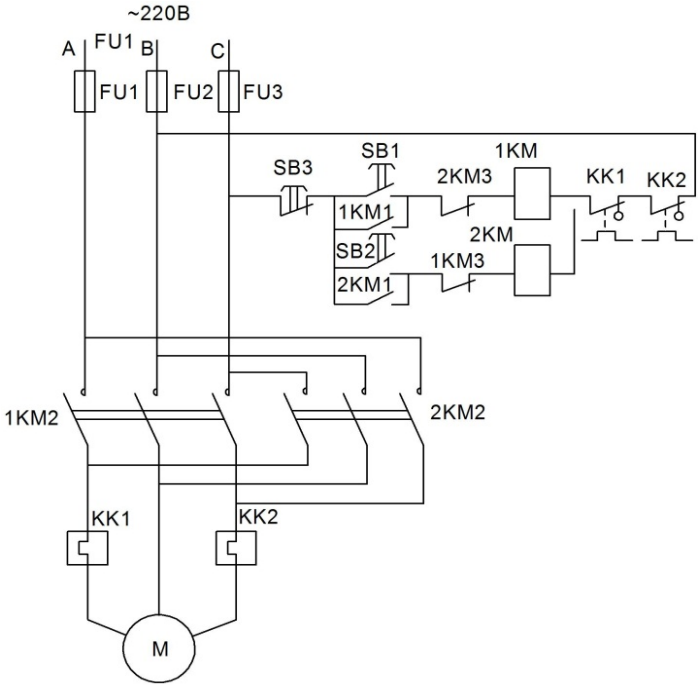



Рис. 6.4. Схема управления реверсивным электродвигателем

При замыкании кнопкой SB1 цепи питания магнитного пускателя 1КМего нормально замкнутый блок-контакт 1КМЗ в цепи питания магнитного пускателя 2КМ размыкается. Это делает невозможным включение магнитного пускателя 2КМ без предварительного включения магнитного пускателя 1КМ кнопкой SB3. Аналогично при включении магнитного пускателя 2КМ кнопкой SB2 невозможно одновременное включение магнитного пускателя 1КМ. Включение питания на обмотки двигателя осуществляется контактами 1КМ2 или 2КМ2.

# 7. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

## 7.1. Основные понятия и определения

Любая инженерная система, любой технологический процесс подвержены действию различных факторов, случайных по своей природе, которые нельзя предусмотреть заранее. Такие факторы называются

*возмущениями.* К ним относятся, например, случайные изменения потребления воды, температуры воздуха и теплоносителя, характеристик оборудования и др. Возмущающие воздействия вызывают изменения принятого режима работы системы, что, в свою очередь, приводит к изменению таких технико-экономических показателей (ТЭП) системы, как производительность, расход энергии и т. п. Поэтому для обеспечения требуемых ТЭП необходимо компенсировать колебания заданного режима, вызванные действием возмущений. Такое целенаправленное воздействие на систему представляет собой *процесс управления.* Совокупность требований, осуществляемых в процессе управления, называется *целью управления.* Наконец, сам управляемый процесс вместе с оборудованием, с помощью которого он реализуется, является *объектом управления.* Объект управления и устройства, необходимые для осуществления процесса управления, называются *системой управления.*

Современные инженерные системы весьма сложны и характеризуются большим числом параметров, влияющих на их ТЭП. Поэтому управление этими объектами организуют по так называемому иерархическому принципу.

*Иерархический принцип управления* заключается в многоступенчатой организации процесса управления, где каждая ступень имеет свои объекты и цели управления, которые зависят от технологического режима. Режим, при котором достигаются заданные показатели, называется *оптимальным.* Но технологический режим изменяется под действием случайных факторов и поэтому может существенно отклоняться от оптимального. Поскольку эти отклонения всегда ухудшают ТЭП, необходимо поддерживать технологические параметры процесса как можно ближе к их оптимальным значениям.

Управление можно организовать в виде двух ступеней. На верхней ступени цель управления заключается в поиске оптимального режима, и объектом управления при этом являются весь технологический процесс и его оборудование, на нижней ступени – обеспечение минимальных отклонений параметров от их оптимальных значений. Эта цель достигается относительно легко и заключается в *стабилизации технологических параметров.* В этом случае часто вместо термина «управление» применяют термин «регулирование».

При подобной организации процесса управления найденные на верхней ступени оптимальные значения технологических параметров можно рассматривать как «руководящие указания» для нижней, т. е. в общем процессе управления нижняя ступень подчинена верхней.

Поэтому такие ступени обычно называют *иерархическими уровнями управления.*

При управлении современными зданиями (сооружениями) в целом, т. е. рассматривая их как объекты жизнеобеспечения, возникают другие цели и задачи, которые нельзя отнести к отдельным инженерным системам или технологическим процессам. Это, например, задачи организационно-оперативного управления. Поэтому процесс управления должен включать еще один уровень, на котором решаются организационные задачи. Он является высшим иерархическим уровнем.

Таким образом, структура управления эксплуатацией современных строительных объектов характеризуется тремя уровнями иерархии (рис. 7.1).

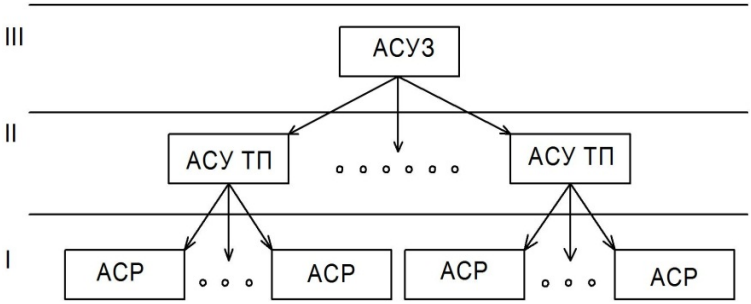



Рис. 7.1. Иерархия управления эксплуатацией здания (сооружения)

Нижний уровень (1) представлен так называемыми локальными системами регулирования, функции которых сводятся к стабилизации отдельных технологических параметров. Такие задачи решаются автоматическими устройствами без участия человека, и поэтому системы нижнего иерархического уровня называются *автоматическими системами регулирования* (АСР). Объекты регулирования на этом уровне – элементарные процессы с соответствующим инженерным оборудованием.

Следующий иерархический уровень (II) образуют системы управления технологическими процессами. Объектами управления на этом уровне являются технологические установки или участки вместе с оборудованием и локальными АСР. Здесь решаются задачи оптимизации технологических режимов процессов. Кроме того, в функции

управления на этом уровне входят выявление и устранение ненормальных (аварийных) режимов, переключение оборудования, вычисление ТЭП и т. п. Указанные функции достаточно сложны и не могут быть целиком возложены на автоматические устройства. Поэтому здесь в системах управления применяют управляющие вычислительные машины (УВМ), а в процессах управления участвует оператор УВМ. Такие системы управления получили название *автоматизированных систем управления технологическими процессами* (АСУ ТП).

На высшем иерархическом уровне (III) осуществляется управление всем зданием. Например, объектами управления здесь помимо традиционных инженерных систем могут быть видеонаблюдение, охранно-пожарная сигнализация, контроль доступа, охрана периметра, телефонная связь, эфирное и спутниковое телевидение, а также все вспомогательные службы. На этом уровне задачи управления всей системой жизнеобеспечения и безопасности решаются с применением УВМ и обслуживающего персонала. Система этого уровня получила название *автоматизированной системы управления зданием* (АСУЗ).

Из сказанного видна роль локальных АСР нижнего иерархического уровня в общем процессе управления современными зданиями: они являются периферийными органами управления, через которые реализуются решения, принимаемые в процессе управления на более высоких иерархических уровнях.

Все процессы управления, в том числе и регулирования, имеют общие закономерности, не зависящие от конкретных объектов и целей управления.

Рассмотрим процесс регулирования уровня в емкости при произвольно изменяющемся потреблении (стоке) жидкости. Стабилизировать уровень на заданном значении можно изменением притока в зависимости от отклонения уровня от заданного значения. Предположим, что вначале уровень в емкости постоянный и равен заданному. Случайное уменьшение стока вызовет отклонение уровня выше заданного. Тогда необходимо прикрывать клапан на притоке. При отклонении уровня ниже заданного значения клапан, наоборот, следует приоткрывать. Этот процесс регулирования состоит из пяти составляющих. Во-первых, получение информации о заданном значении уровня. В данном случае это значение заранее известно. Во-вторых, получение информации о фактическом уровне, т. е. Его измерение. В-третьих, определение величины и знака отклонения уровня от заданного. В-четвертых, установление требуемого изменения притока в зависимости от величины и знака отклонения. В-пятых, изменение притока открытием или закрытием клапана.

В рассмотренном примере процесс управления был неавтоматическим: в нем принимал участие человек. В АСР процесс управления осуществляется автоматически. Так, регулировать уровень в емкости автоматически можно, например, с помощью АСР, показанной на рис. 7.2. Поплавок *1* в этой системе перемещается вместе с уровнем, а клапан *4* изменяет расход на притоке. Поплавок связан с клапаном через поворотный рычаг *2* и прикрепленный к нему шток *3*.

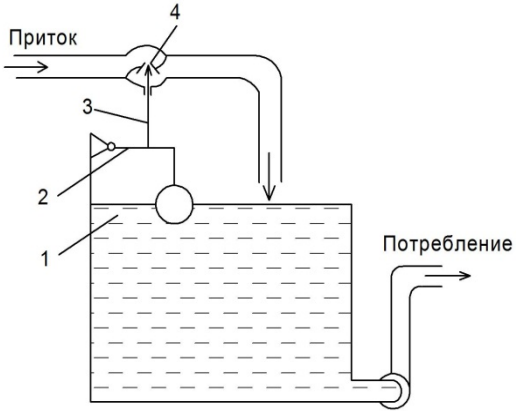



Рис. 7.2. Автоматическое регулирование уровня жидкости в емкости:
*1* – поплавок; *2* – рычаг; *3* – шток; *4* – клапан

В такой АСР любое отклонение уровня от заданного, вызванное колебаниями потребления, приведет к перемещению поплавка и связанного с ним клапана. При отклонении уровня, выше заданного клапан, будет прикрываться, а при отклонении ниже заданного, наоборот, приоткрываться. Таким образом, в этой системе все указанные составляющие процесса регулирования выполняются автоматически: при отклонении уровня от заданного значения поплавок отклоняет рычаг, а перемещение штока изменяет степень открытия клапана и приводит тем самым к требуемому изменению притока. Из рассмотренного примера видно, что для управления объектом необходимо получить информацию о заданном и фактическом его состоянии, определить отклонение фактического состояния от заданного, на основе этого выработать целенаправленное воздействие на объект и осуществить его.

Несмотря на разнообразие встречающихся в инженерных системах

объектов, отмеченный общий характер процессов управления не зависит от физической природы объектов и технических средств управления. Так, процесс регулирования уровня в емкости не зависит от конфигурации емкости, расположения трубопроводов, природы жидкости, конструкции клапана и т. п. Это позволяет изучать закономерности управления в общем виде независимо от природы объектов управления и протекающих в них технологических процессов. Такие закономерности изучает *теория управления.* Рассмотрим основные термины и понятия этой теории.

Как отмечалось, любой процесс управления слагается из пяти основных действий. В АСР эти действия выполняют технические устройства. Устройство для получения информации о состоянии объекта управления называется, как уже отмечалось, *измерительным устройством.* Устройство, которое определяет отклонение измеренного значения параметра от заданного, называется *сумматором.* Сумматор производит алгебраическое суммирование – вычитание измеренного значения параметра из заданного. Устройство, вырабатывающее необходимое воздействие на объект, называется *регулятором.* Для передачи этого воздействия на объект служит *регулирующий орган.* Обычно для перемещения регулирующего органа применяется отдельное устройство – *исполнительный механизм.* Все эти устройства, а также объект управления являются элементами АСР. В системах автоматизации некоторые из перечисленных устройств бывают конструктивно совмещены – например, сумматор может быть частью регулятора, а исполнительный механизм объединен с регулирующим органом.

Нетрудно убедиться, что в рассмотренной АСР объектом регулирования является емкость с притоком и потреблением жидкости, измерительным устройством – поплавок, рычаг выполняет роль сумматора и регулятора, а клапан – регулирующего органа. Структурная схема этой системы, показывающая взаимосвязь ее элементов, приведена на рис. 7.3.

Как видно из схемы, элементы АСР связаны между собой таким образом, что воздействуют друг на друга: измерительное устройство воздействует через сумматор на регулятор, регулятор – на регулирующий орган, регулирующий орган – на объект регулирования. Эти воздействия передаются от одного элемента к другому посредством сигналов.

Рис. 7.3. Структурная схема АСР уровня в емкости

АСР применена механическая связь регулятора с измерительным устройством и регулирующим органом. Общим свойством любых сигналов является передача воздействия от одних элементов системы к другим. Например, при регулировании уровня в емкости регулирующий орган воздействует на объект регулирования изменением притока в емкость. Здесь сигналом является расход жидкости на притоке.

Передача воздействия от одного элемента к другому всегда происходит в одном направлении – от предыдущего к последующему. Поэтому еще одним общим свойством сигналов является их направленность. В соответствии с этим для каждого элемента АСР различают *входные* и *выходные сигналы.* Выходной сигнал элемента является его реакцией на входной сигнал. Иначе говоря, выходной сигнал элемента зависит от его входного сигнала.

В общем случае элемент АСР может иметь несколько входных и выходных сигналов. Например, для регулирующего органа в АСР уровня в емкости входной сигнал – степень открытия клапана, а выходной – расход жидкости через него. Для самой емкости с жидкостью как объекта регулирования входными сигналами являются расходы на притоке и потреблении, зависящий от этих сигналов уровень в емкости – выходной сигнал.

Входные и выходные сигналы объектов регулирования могут не совпадать с входными и выходными потоками вещества и энергии. Так, в емкости, изображенной на рис. 7.2, приток является входным, а потребление – выходным потоком. Вообще следует помнить, что в процессах управления конструкция элементов, материалы, из которых они изготовлены, природа выходных и входных сигналов и тому по-

добные факторы не играют существенной роли в процессах регулирования. Имеет значение лишь характер преобразования входных сигналов в выходные.

## 7.2. Автоматическое регулирование температуры

Температура является показателем термодинамического состояния объекта и используется как выходная координата при автоматизации тепловых процессов. Характеристики объектов в системах регулирования температуры зависят от физических параметров процесса и конструкции аппарата. Поэтому общие рекомендации по выбору АСР температуры сформулировать невозможно и требуется тщательный анализ характеристик каждого конкретного процесса.

Регулирование температуры в инженерных системах производится значительно чаще, чем регулирование каких-либо других параметров. Диапазон регулируемых температур невелик. Нижний предел этого диапазона ограничен минимальным значением температуры наружного воздуха (–40 °С), верхний – максимальной температурой теплоносителя (+150 °С).

К общим особенностям АСР температуры можно отнести значительную инерционность тепловых процессов и измерителей (датчиков) температуры. Поэтому одной из основных задач при создании АСР температуры является уменьшение инерционности датчиков.

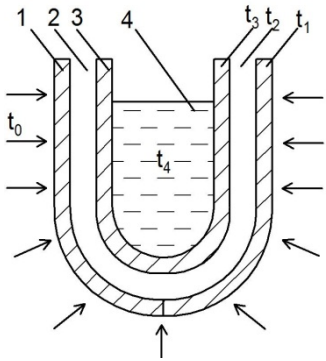



Рис. 7.4. Принципиальная схема манометрического термометра: *1* – защитный чехол; *2* – воздушная прослойка; *3* – стена термометра; *4* – рабочая жидкость

Рассмотрим в качестве примера, характеристики наиболее распространенного в инженерных системах манометрического термометра в защитном чехле (рис. 7.4). Структурную схему такого термометра можно представить в виде последовательного соединения четырех тепловых емкостей (рис. 7.5): защитного чехла *1*, воздушной прослойки *2*, стенки термометра *3* и рабочей жидкости *4*.

Основными направлениями уменьшения инерционности датчиков температуры являются:

– повышение коэффициентов

теплоотдачи от среды к чехлу в результате правильного выбора места установки датчика; при этом скорость движения среды должна быть максимальной; при прочих равных условиях более предпочтительна установка термометров в жидкой фазе (по сравнению с газообразной), в конденсирующемся паре (по сравнению с конденсатом) и т. п.;

– уменьшение теплового сопротивления и тепловой ёмкости защитного чехла в результате выбора его материала и толщины;

– уменьшение постоянной времени воздушной прослойки за счет применения наполнителей (жидкости, металлической стружки); у термопар рабочий спай припаивается к корпусу защитного чехла;

– выбор типа первичного преобразователя: например, при выборе необходимо учитывать, что наименьшей инерционностью обладает термопара в малоинерционном исполнении, наибольшей – манометрический термометр.

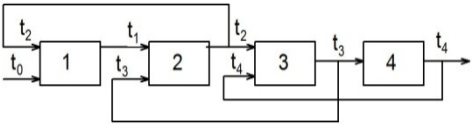



Рис. 7.5. Структурная схема манометрического термометра

Каждая АСР температуры в инженерных системах создается для вполне конкретной цели (регулирования температуры воздуха в помещениях, тепло- или холодоносителя) и, следовательно, предназначена для работы в очень небольшом диапазоне. В связи с этим условия применения той или иной АСР определяют устройство и конструкцию как датчика, так и регулятора температуры. Например, при автоматизации инженерных систем широко применяются регуляторы температуры прямого действия с манометрическими измерительными устройствами. Так, для регулирования температуры воздуха в помещениях административных и общественных зданий при использовании инжекционных и вентиляторных доводчиков трехтрубной схемы тепло- и холодоснабжения применяют регулятор прямого действия прямого типа РТК (рис. 7.6), который состоит из термосистемы и регулирующего клапана. Термосистема, пропорционально перемещающая шток регулирующего клапана при изменении температуры рециркуляционного воздуха на входе в доводчик, включает чувствительный элемент, задатчик и исполнительный механизм.

Эти три узла соединены капиллярной трубкой и представляют единый герметичный объем, заполненный термочувствительной (рабочей) жидкостью. Трехходовой регулирующий клапан управляет подачей горячей или холодной воды к теплообменнику инжекционного довод-

чика и состоит из корпуса и регулирующих органов. С повышением температуры воздуха рабочая жидкость термосистемы увеличивает свой объем и сильфон клапана перемещает шток и регулирующий орган, закрывая прохождение горячей воды через клапан.

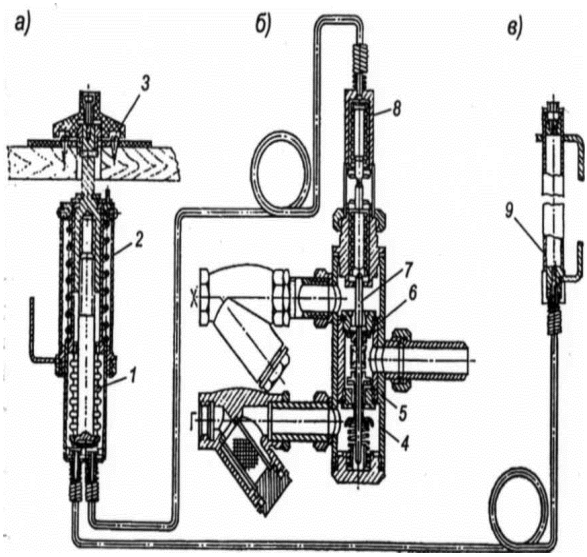



Рис. 7.6. Регулятор температуры типа РТК: *а* – регулятор; *б* – регулирующий клапан; *в* – термосистема; *1* – сильфон; *2* – задатчик; *3* – ручка настройки; *4* – корпус; *5, 6* – регулирующие органы соответственно горячей и холодной воды; *7* – шток; *8* – исполнительный механизм; *9* – чувствительный элемент

При увеличении температуры на 0,5–1 °С регулирующие органы остаются неподвижными (проходы горячей и холодной воды закрыты), а при более высокой температуре открывается лишь проход холодной воды (проход горячей воды остается закрытым). Заданная температура обеспечивается вращением ручки настройки, связанной с сильфоном, который изменяет внутренний объем термосистемы. Регулятор может быть настроен на температуру в диапазоне от 15 до 30 °С.

При регулировании температуры в водо- и пароводных подогревателях и охладителях используются регуляторы типа РТ, которые незначительно отличаются от регуляторов типа РТК. Их основная осо-

бенность – совмещенное исполнение термобаллона с задатчиком, а также использование двухседельного клапана в качестве регулирующего органа. Такие манометрические регуляторы выпускаются на несколько 40-градусных диапазонов в пределах от 20 до 180 °С с диаметром условного прохода от 15 до 80 мм. В связи с наличием в этих регуляторах большой статической ошибки (10 °С) их не рекомендуется применять для высокоточного регулирования температуры.

Манометрические термосистемы используются также в пневматических П-регуляторах, широко применяемых для регулирования температуры в инженерных системах кондиционирования воздуха и вентиляции (рис. 7.7). Здесь при изменении температуры изменяется давление в термосистеме, которое через сильфон действует на рычаги, передающие усилие на шток пневмореле и мембрану.

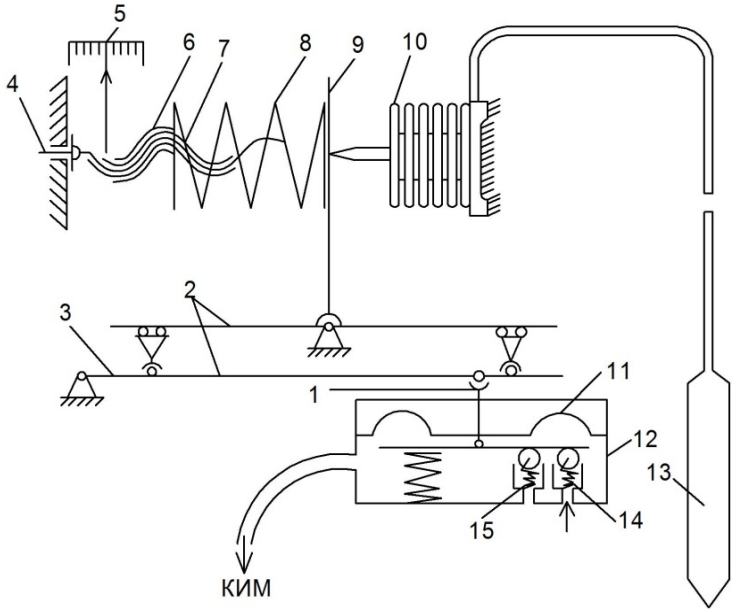



Рис. 7.7. Схема пневматического П-регулятора температуры с манометрической термосистемой: *1* – шток пневнореле; *2* – узел неравномерности; *3, 9* – рычаги; *4, 7* – винты; *5* – шкала; *8* – пружина; *10* – сильфон; *11* – мембрана; *12* – пневмореле; *13* – термобаллон; *14* – питающий клапан; стравливающий клапан

При равенстве текущей температуры с заданной вся система находится в равновесии, оба клапана пневмореле, питающий и стравливающий, закрыты. При увеличении давления на шток начинает открываться питающий клапан. К нему подведено давление от сети питания сжатым воздухом, в результате чего в пневмореле образуется давление управления, возрастающее от 0,2 до 1 кгс/см$^2$ пропорционально увеличению температуры контролируемой среды. Этим давлением приводится в действие исполнительный механизм.

Для автоматического регулирования температуры воздуха в помещениях начали широко использоваться термостатические клапаны американской фирмы *Honeywell* и радиаторные терморегуляторы (термостаты) *RTD,* выпускаемые московским филиалом датской фирмы *Danfoss* необходимая температура задается поворотом настроенной рукоятки (головки) с указателем от 6 до 26 °С. Понижение температуры на 1 °С (например, с 23 до 22 °С) позволяет экономить 5–7 % тепла, потребляемого на отопление. Термостаты *RTD* позволяют избежать перегрева помещений в переходный и другие периоды года и обеспечить минимально необходимый уровень отопления в помещениях с периодическим проживанием людей. Кроме этого, радиаторные терморегуляторы *RTD* обеспечивают гидравлическую устойчивость для двухтрубной системы отопления и возможность ее регулировки и увязки в случае ошибок при монтаже и проектировании без использования дроссельных шайб и других конструктивных решений.

Терморегулятор состоит из регулирующего клапана (корпуса) и термостатического элемента с сильфоном (головки). Соединение корпуса и головки производится с помощью накидной гайки с резьбой. Для удобства монтажа на трубопровод и присоединения терморегулятора к отопительному прибору он комплектуется накидной гайкой с резьбовым ниппелем. Температура в помещении поддерживается путем изменения расхода воды через отопительный прибор (радиатор или конвектор). Изменение расхода воды происходит за счет перемещения штока клапана сильфоном, заполненным специальной смесью газов, изменяющих свой объем даже при незначительном изменении температуры окружающего сильфон воздуха. Удлинению сильфона при повышении температуры противодействует настроечная пружина, усилие которой регулируется поворотом рукоятки с указателем желаемого значения температуры.

Для лучшего соответствия любым системам отопления выпускаются два типа корпусов регулятора: *RTD-G* с малым сопротивлением для однотрубных систем и *RTD-N* с повышенным сопротивлением для

двухтрубных систем. Корпуса изготавливаются для прямого и углового клапанов.

Термостатические элементы регуляторов изготавливаются в пяти вариантах: со встроенным датчиком; с дистанционным датчиком (длина капиллярной трубки 2 м); с защитой от неумелого использования и воровства; с ограничением диапазона настройки до 21 °С. В любом исполнении термостатический элемент обеспечивает ограничение настроенного диапазона температур или фиксации на требуемой температуре воздуха в помещении.

Срок эксплуатации регуляторов *RTD* 20–25 лет, а при определенных условиях эксплуатации более 30 лет.

Регулирующий прибор (погодный компенсатор) *ECL* (рис. 7.8) обеспечивает поддержание температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы отопления в зависимости от температуры наружного воздуха по соответствующему конкретному ремонту и конкретному объекту отопительному графику. Прибор воздействует на регулирующий клапан с электроприводом (при необходимости – и на циркуляционный насос) и позволяет осуществлять следующие операции:

– поддержание расчетного отопительного графика;

– ночное снижение температурного графика по недельным (интервал 2 ч) или 24-часовым (интервал 15 мин) программируемым часам (в случае электронных часов интервал 1 мин);

– натоп помещения в течение 1 ч после ночного снижения температуры;

– подключение через релейные выходы регулирующего клапана и насоса (или 2 регулирующих клапанов и 2 насосов);

– автоматический переход из летнего режима в зимний и обратно по заданной температуре наружного воздуха;

– прекращение ночного снижения температуры при понижении наружных температур ниже заданного значения; защиту системы от замораживания;

– коррекцию отопительного графика по температуре воздуха в помещении;

– переход на ручное управление приводом клапана; максимальные и минимальные ограничения температуры воды на подаче и возможность фиксированного или пропорционального ограничения температуры обратной воды в зависимости от температуры наружного воздуха;

– самотестирование и цифровую индикацию значений температур всех датчиков и состояний клапанов и насосов;

– установку зоны нечувствительности, зоны пропорциональности и времени накопления;

– возможность работы по накопленным за заданный период или текущим значениям температур;

– задание коэффициента тепловой устойчивости здания и задание влияния отклонения температуры обратной воды на температуру воды на подаче;

– защиту от образования накипи при работе с газовым котлом.

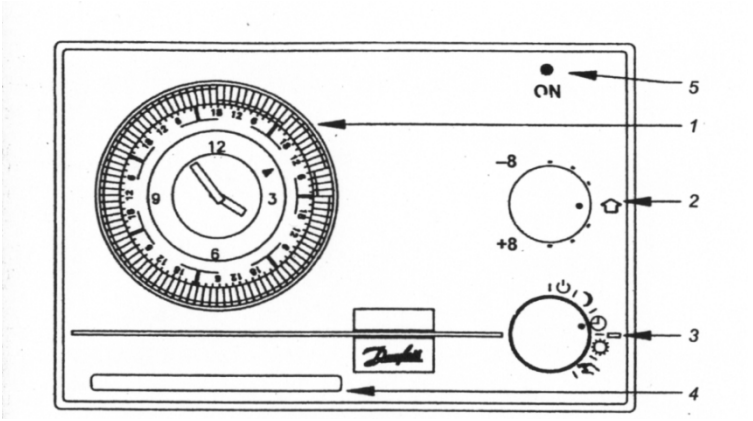



Рис. 7.8. Погодный компенсатор ECL с настройкой доступной потребителю

В схемах автоматизации инженерных систем используются также биметаллические и дилатометрические терморегуляторы, в частности электрический двухпозиционный и пневматический пропорциональный.

Электрический биметаллический датчик предназначен в основном для двухпозиционного регулирования температуры в помещениях. Чувствительным элементом этого прибора является биметаллическая спираль, один конец которой закреплен неподвижно, а другой свободен и удовлетворяет подвижным контактам, замыкающимся или размыкающимся с неподвижным контактом в зависимости от текущего и заданного значений температуры. Заданную температуру устанавли-

вают поворотом шкалы настройки. В зависимости от диапазона настройки терморегуляторы выпускаются в 16 модификациях с общим диапазоном настройки от –30 до + 35 °С, причем каждый регулятор имеет диапазон 10, 20 и 30 °С. Погрешность срабатывания ±1 °С на средней отметке и до ±2,5 °С на крайних отметках шкалы.

Пневматический биметаллический регулятор в качестве преобразователя-усилителя имеет сопло-заслонку, на которую действует усилие биметаллического измерительного элемента. Эти регуляторы выпускаются 8 модификаций, прямого и обратного действия с общим диапазоном настройки от +5 до +30 °С. Диапазон настройки каждой модификации 10 °С.

Дилатометрические регуляторы устроены на использовании разности коэффициентов линейного расширения инварного (железоникелевый сплав) стержня и латунной или стальной трубки. Эти терморегуляторы по принципу действия регулирующих устройств не отличаются от подобных регуляторов, использующих манометрическую измерительную систему.

## 7.3. Автоматическое регулирование давления

Давление является показателем соотношения расходов газовой или жидкой фазы на входе в аппарат и выходе из него. Постоянство давления свидетельствует о соблюдении материального баланса газовой (жидкой) фазы.

В инженерных системах зданий и сооружений давление регулируется в широких пределах: от 1–5 мм вод. ст., или 10–50 Па (в камерах смесительных клапанов двухканальных систем кондиционирования воздуха), до 30–100 мм. вод. ст., или 300–1000 Па и более (в воздуховодах и камерах статического давления систем I вентиляции), и до 60 кгс/см$^2$ (6 МПа), т. е. до величины, в 10 000 разе,большей (в устройствах водо-, холодо- и теплоснабжения, а также в установках снабжения сжатым воздухом). Такие большие диапазоны регулируемых давлений обусловливают разнообразие типов – применяемых регуляторов.

Наиболее простыми регуляторами давления прямого действия; являются грузовые регуляторы давления «до себя» и «после себя». Регулятор давления «до себя» стабилизирует давление в трубопроводе до регулирующего клапана (по направлению потока), а регулятор «после себя» – после клапана. Регулятор давления «после себя» (рис. 7.9) состоит из регулирующего клапана с двухседельным разгруженным та-

рельчатым плунжером, закрывающим проход при перемещении вниз головки с резиновой мембраной, являющейся чувствительным элеэлементом регулятора, и колонки с грузовым устройством. Мембрана, закрытая сверху крышкой, представляет собой камеру давления. Регулируема среда через импульсную трубку оказывает на мембрану давление, вследствие чего создается усилие $F_1$ которое через шток передается плунжеру. На шток в противоположном силе $F_1$ направлении действует усилие $F_2$, создаваемое грузом, насаженным на рычажное устройство. Если давление в трубопроводе за клапаном возрастет, то усилие, передаваемое мембраной на шток, увеличится, шток начнет опускаться, а клапан будет приоткрываться. В результате расход регулирующей среды уменьшится, давление за клапаном снизится, и система придет в равновесное состояние в тот момент, когда силы, действующие на шток от мембраны и от груза, будут равны. Плунжер клапана займет новое положение, но сила, создаваемая грузом, останется практически прежней. Этот регулятор является астатическим, так как возвращает регулируемый параметр к заданному значению, а его регулирующий орган может при этом занимать любое положение.

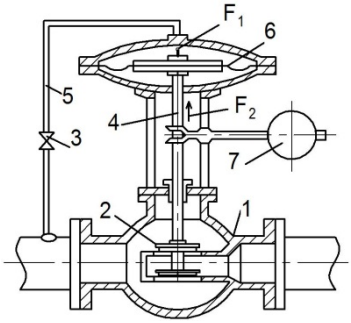


Рис. 7.9. Грузовой регулятор давления «после себя»: *1* – клапан; *2* – плунжер; *3* – вентиль; *4* – шток; *5* – импульсная трубка; *6* – резиновая мембрана; *7* – груз

Настраивают такой регулятор на заданное значение давления подбором сменных грузов и перемещением постоянного груза вдоль длинного плеча рычага. Заданное значение давления контролируют манометром, который присоединяют к импульсной трубке. Эти регуляторы имеют сравнительно большую зону нечувствительности (от 6 до 12 % верхнего предела настройки) и поэтому могут привести процесс регулирования к колебательному расходящемуся. Чтобы сгладить пульсирующие изменения давления, в импульсную трубку врезают игольчатый вентиль.

Регулятор давления «до себя» отличается от рассмотренного только расположением плунжера клапана относительно седла, что при увеличении давления в импульсной трубке увеличивает проход регулируемой среды. Регуляторы давления выпускают с условным проходом от 50 до 250 мм и диапазоном настроек от 0, 15 до 13 кгс/см$^2$ (от 0, 015 до

1, 3 МПа) с ограниченным пределом настройки для каждой модификации.

Большое распространение, особенно в системах теплоснабжения, получили регулирующие клапаны прямого (непосредственного) действия типа УРРД (рис. 7.10). Этот регулятор состоит из односедельного, разгруженного сильфонным узлом запорно-регулирующего органа, который соединен с мембранно-пружинным исполнительным механизмом, состоящим из эластичной мембраны и противодействующей пружины *10*. На нижней крышке корпуса установлен узел настройки, включающий в себя стакан, настроечную пружину *2* и винт.

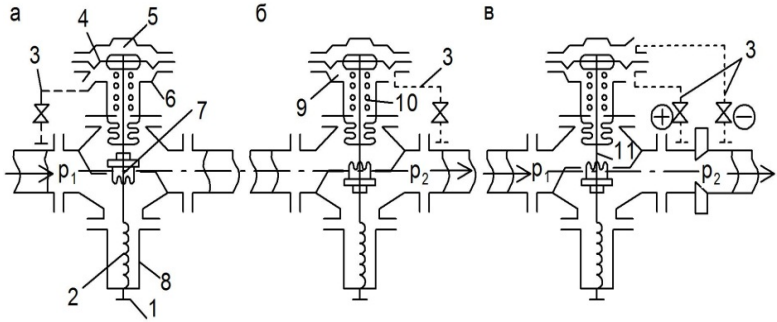



Рис. 7.10. Принципиальные схемы включения регулятора типа УРРД:
*а* – регулирование давления «до себя»; *б* – регулирование давления «после себя»;
*в* – регулирование перепада давления или расхода; *1* – винт; *2, 10* – пружины;
*3* – импульсная трубка; *4* – мембрана; *5, 9* – камеры; *6* – исполнительный механизм;
*7* – регулирующий орган; *8* – стакан; *11* – шток

Импульс регулируемого параметра проводится по импульсным трубкам непосредственно в камеру *5* или *9* мебранно-пружинного исполнительного механизма. Возникающее при этом импульсе усилие (или разность усилий при регулировании расхода, см. рис. 7.10, *в*) на мембрану уравновешивается натяжением настроечной пружины *2*. Отклонение регулируемого параметра в ту или другую сторону от заданного значения нарушает равновесие действующих сил, что вызывает перемещение регулирующего органа и изменение расхода. В результате этого заданное значение регулируемого параметра будет восстанавливаться.

При колебании величины регулируемого давления изменятся усилие на мембрану и, следовательно, уравновешивающее это усилие

натяжение настроечной пружины. Другими словами, у этого регулятора величина давления зависит от положения регулирующего органа, т. е. от расхода. Такая зависимость является характерным признаком статического регулятора, в котором скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна скорости изменения параметра, но не зависит от величины его отклонения. Этот регулятор не способен вернуть давление точно к заданному значению. Величина регулируемого давления будет зависеть от положения клапана, т. е. от степени сжатия пружины. Статические регуляторы, как правило, лучше и надежнее в установках теплоснабжения, чем астатические.

Регуляторы УРРД выпускаются с условным проходом 25, 50 и 80 мм и диапазоном возможных настроек от 0,4 до 6 кгс/см$^2$ (от 0,04 до 0,6 МПа). При необходимости регулировать давление от 6 до 16 кгс/см$^2$ (от 0,6 до 1,6 МПа) применяют гидравлический регулятор РД-ЗА в комплекте с УРРД. Регулятор РД-ЗА является универсальным, т. е. в зависимости от вида сборки может поддерживать заданное давление, перепад давления, уровень воды и расход регулируемой среды. Этот регулятор имеет усилитель-преобразователь типа сопла-заслонки, основанный на принципе дросселирования заслонкой потока рабочей жидкости, вытекающей из сопла. Рабочая жидкость является источником вспомогательной энергии. Заслонка находится под воздействием чувствительного элемента, воспринимающего регулируемую величину.

Рассмотрим принцип действия РД-ЗА в комплекте с УРРД в схеме регулирования давления «до себя» (рис. 7.11). Вода из водопровода давлением $p_в$ (рабочая жидкость – вспомогательная энергия) сначала пропускается через дроссель постоянного сечения, а затем попадает в камеру, соединенную с дросселем переменного сечения и с импульсной линией *3*, соединяющей РД-ЗА с мембранно-пружинным исполнительным механизмом регулятора УРРД. Рабочая жидкость через дроссель переменного сечения (сопло-заслонку) сливается в дренаж.

Заслонка связана с чувствительным элементом (сильфоном) регулятора. Увеличение давления $p_x$ в импульсной линии *4* регулятора РД-ЗА приводит к увеличению давления в камере над сильфоном и приближает заслонку к соплу. Давление $p_x$ в камере увеличивается, и регулятор УРРД повышает расход регулируемой среды через клапан, что приводит к уменьшению давления в трубопроводе перед УРРД.

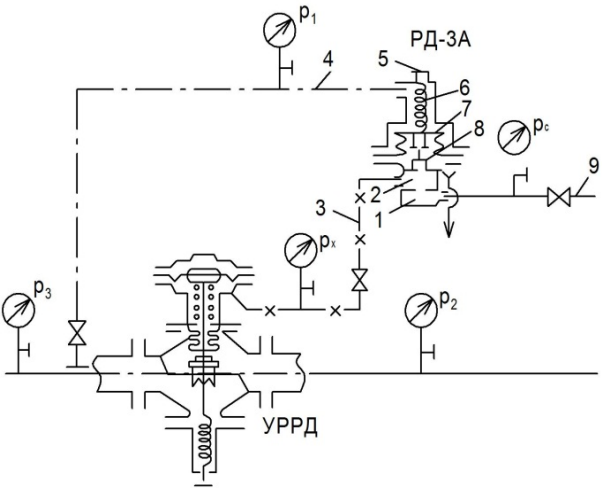



Рис. 7.11. Принципиальная схема включения регулятора РД – 3А и УРРД при регулировании давления «до себя»; *1* – дроссель постоянного сечения; *2* – камера; *3, 4* – импульсные линии; *5* – винт; *6* – пружина; *7* – сильфон; *8* – дроссель переменного сечения; *9* – водопровод

Регулятор РД-3А устанавливается на заданное значение натяжением настроечной пружины с помощью винта. РД-3А выполняет роль П-регулятора. В некоторых случаях при оснащении регулятора приставкой можно превратить его в изодромный ПИ-регулятор. Регулятор РД-3А может иметь одно-, двух- и трехсильфонную сборку, а узел его управляющего клапана может собираться по одно- и двухсопловой системе. Эта особенность позволяет широко использовать его при регулировании различных параметров в системах теплоснабжения зданий и сооружений.

Для регулирования давления используются и общепромышленные регуляторы электрической и пневматической ветви ГСП, а также реле и регуляторы давления с двух- и трехпозиционными устройствами. В качестве чувствительных элементов этих регуляторов применяют одновитковые трубчатые пружины (ЭКМ-IV), многовитковые (геликоидальные) пружины (МГ), сильфоны (РД) и мембраны. Таким образом, измерительные элементы и регулирующие устройства почти ничем не отличаются от описанных выше терморегуляторов с манометрической термосистемой.

В последние годы в системах отопления, теплоснабжения и котельных установках стали широко использоваться регуляторы давления JVD-JVF фирмы Danfoss. Такой автоматический пропорциональный регулятор прямого действия состоит из регулирующей части JVD и односедельного разгруженного клапана JVF (рис. 7.12).

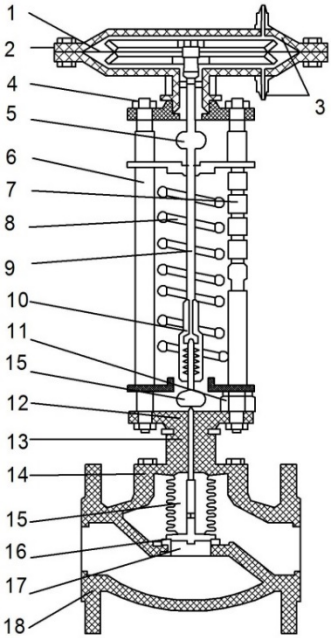



Рис. 7.12. Регулятор давления JVD-JVF; *1* – мембрана; *2* – корпус мембраны; *3* – фитинги для импульсных трубок; *4* – сальниковое уплотнение; *5* – соединительный узел; *6* – крепежный стержень; *7* – стержень с калибровочными обозначениями; *8* – пружина; *9* – шток; *10* – шпиндель; *11* – регулирующая гайка; *12* – сальниковое уплотнение; *13* – тефлоновые кольца; *14* – крышка; *15* – разгружающий сильфон; *16* – тарелка клапана; *17* – седло клапана; *18* – корпус клапана

В зависимости от способа установки шпинделя регулирующей части прибор может работать как в качестве регулятора перепада давления или ограничителя расхода воды (при росте перепада давления клапан закрывается), так и качестве регулятора постоянства расхода (при росте перепада давления клапан открывается). Регулятор можно устанавливать на подающем или обратном трубопроводе, при этом

направление движения потока должно соответствовать направлению, показанному стрелкой на корпусе прибора.

## 7.4. Автоматическое регулирование расхода воды

Необходимость регулирования расхода возникает при автоматизации многих инженерных систем. Например, в тепловых пунктах зданий регулируют расход теплоносителя, подаваемого в систему отопления. Для этой цели часто применяют рассмотренный регулятор прямого действия типа УРРД.

Системы регулирования расхода характеризуются двумя особенностями: малой инерционностью собственно объекта регулирования; наличием высокочастотных составляющих в сигнале изменения расхода, обусловленных пульсациями давления в трубопроводе, которые вызываются работой насосов и вентиляторов или случайными колебаниями расхода при дросселировании потока через сужающие устройства.

Объектом при регулировании расхода является участок трубопровода между точкой измерения расхода (например, местом установки сужающего устройства) и регулирующим органом. Длина этого участка определяется правилами установки сужающих устройств и регулирующих органов и составляет несколько метров. Время чистого запаздывания обычно составляет несколько долей секунды для газов и несколько секунд для жидкостей. Ввиду малой инерционности такого объекта особые требования предъявляются к выбору средств автоматизации и методов расчета АСР расхода. В большинстве случаев инерционность цепей контроля и регулирования расхода соизмерима с инерционностью объекта и ее необходимо учитывать при расчете АСР расхода.

При регулирования расхода применяют один из трех способов: дросселирование потока через регулируемый орган, устанавливаемый на трубопроводе (клапан, шибер, заслонка); изменение напора в трубопроводе с помощью регулируемого источника энергии (например, изменением числа оборотов двигателя насоса или угла поворота лопастей вентилятора); байпасирование, т. е. переброс избытка вещества из основного трубопровода в обводную линию.

Регулирование расхода после центробежного насоса осуществляется регулирующим клапаном, устанавливаемым на нагнетательном трубопроводе (рис. 7.13, *а*).

Если для перекачивания используют поршневой насос, применение

подобной АСР недопустимо, так как при работе регулятора клапан может закрыться полностью, что приведет к разрыву трубопровода (или к помпажу, если клапан установлен на линии всасывания). В этом случае для регулирования расхода используют байпасирование потока (рис. 7.13, *б*).

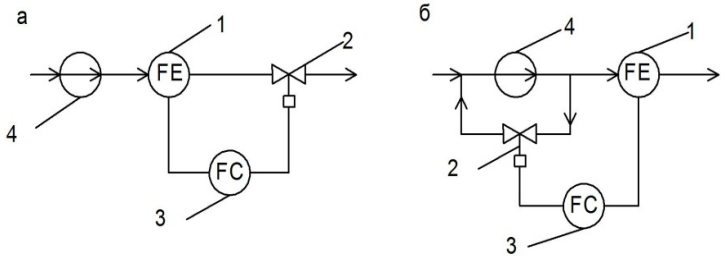



Рис. 7.13. Схема регулирования расхода после центробежного (*а*) и поршневого (*б*) насосов: *1* – измеритель расхода; *2* – регулирующий клапан; *3* – регулятор; *4* – насос

В ряде случаев необходимо поддержание заданного соотношения расходов (например, «топливо-воздух» в котельных установках). Наиболее часто прибегают к регулированию соотношения двух веществ, которое осуществляется по одной из трех схем, описанных ниже.

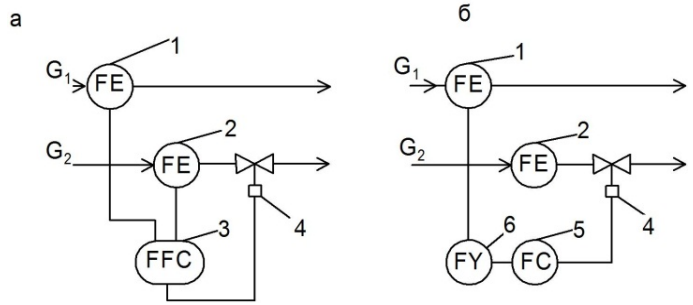



Рис. 7.14. Схемы регулирования соотношения расходов при незаданной общей нагрузке: *1*, *2* – измерители расхода; *3* – регулятор соотношения; *4* – регулирующий клапан; *5* – регулятор расхода; *6* – реле соотношения

По первой схеме (рис. 7.14, *а*) при незаданной общей производительности расход одного вещества $G_1$ называемый «ведущим», может

изменяться произвольно; второе вещество подается при постоянном соотношении, а с первым так, что «ведомый» расход $G_2$ равен $aG_1$.

Иногда вместо регулятора соотношения используются реле соотношения и обычный регулятор для одной переменной (рис. 7.14, *б*). В этом случае выходной сигнал реле соотношения, устанавливающего заданный коэффициент соотношения, подается в виде задания регулятору, обеспечивающему поддержание «ведомого» расхода.

Вторая схема (рис. 7.15, *а*) используется в технологических процессах, когда значение «ведущего» расхода задано. В этом случае кроме АСР соотношения расходов применяют также АСР «ведущего» расхода. По этой схеме в случае изменения задания по расходу, автоматически произойдет и изменение расхода $G_2$, причем в заданном соотношении с $G_1$.

Третья схема (рис. 7.15, *б*) применяется в тех случаях, когда АСР соотношения расходов является внутренним контуром в каскадной системе регулирования третьего технологического параметра $Y$ (например, температура в каком-либо топливосжигающем аппарате).

При этом заданный коэффициент соотношения, $a$ устанавливается внешним регулятором в зависимости от этого параметра так, что $G_2 = \alpha(Y)G_1$.

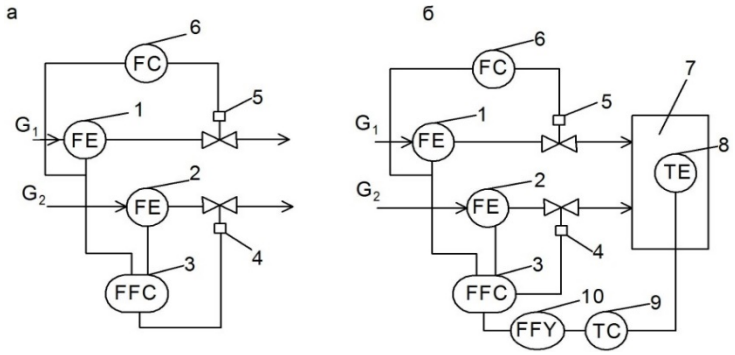



Рис. 7.15. Схема регулирования соотношений расходов при заданной общей нагрузке (*а*) и коррекции коэффициента соотношения по третьему параметру (*б*):
*1, 2* – измерители расхода; *3* – регулятор соотношения; *4, 5* – регулирующие клапаны; *6* – регулятор расхода; *7* – технологический аппарат; *8* – измеритель температуры; *9* – регулятор температуры; *10* – устройство ограничения

Часто в инженерных системах возникает необходимость в аварийной и предупредительной сигнализации о наличии потока воздуха,

протока воды или в сигнализации о предельных значениях расхода тех или иных рабочих сред.

Для регулирования, сигнализации или переключения с одного расходомера на другой применяю различные сильфонные, мембранные или поплавковые диафанометры с регулирующими или сигнальными устройствами. Например, расход теплоносителя на вводе в здание измеряется комплектом приборов, в состав которого входят диафрагма и сильфонный показывающий диафанометр с интегратором. Известно, что такой комплект является коммерческим (по показателям интегратора производится финансовый расчет) и может производить измерения с требуемой точностью только при расходе от 30 до 100 % максимального диапазона шкалы диафанометра. Если длительное время ожидается минимальный расход, значение которого находится ниже 30 % максимального (измеряемого диафанометром), то приходится устанавливать второй комплект расходомера с максимальным пределом измерений, несколько большим 30 % предела первого комплекта. Каждый комплект устанавливают на один из двух параллельных участков трубопровода, оборудованных запорными моторными задвижками. В зависимости от величины расхода теплоносителя сигнальные устройства диафанометров, воздействуя на приводы запорных задвижек, открывают для измерения только один участок трубопровода. Общий расход теплоносителя равен сумме показаний интеграторов обоих комплектов.

Для контроля протока жидкостей по трубопроводам меньшего диаметра (20, 40 и 50 мм) применяют реле протока для установки на горизонтальных участках трубопроводов и в местах перехода; вертикальных участков трубопроводов на горизонтальные.

## 7.5. Автоматическое регулирование уровня воды

Уровень является косвенным показателем гидродинамического равновесия в аппарате или сооружении. Постоянство уровня свидетельствует о соблюдении материального баланса, когда приток жидкости равен стоку и скорость изменения уровня равна нулю. Следует отметить, что приток и сток здесь являются обобщенными понятиями. В простейшем случае, когда в аппарате не происходит никаких фазовых превращений (сборники, смесители, промежуточные емкости, жидкофазные сооружения), приток равен расходу жидкости, подаваемой в аппарат, а сток расходу жидкости, отводимой из аппарата. В более сложных технологических процессах, сопровождающихся измене-

нием фазового состояния веществ, уровень является характеристикой не только гидравлических, но тепловых и массообменных процессов, а приток и сток учитывают фазовые превращения веществ. Такие процессы протекают в испарителях, конденсаторах, выпарных установках и многих других агрегатах.

В зависимости от требуемой точности поддержания уровня применяют либо позиционное, либо его непрерывное регулирование.

Позиционное регулирование применяется в случаях, когда уровень в аппарате требуется поддерживать в заданных, но достаточно широких пределах: $L_Н – L_В$. Такие системы регулирования чаще всего устанавливают на сборниках жидкости или промежуточных емкостях (рис. 7.16). При достижении предельного значения уровня в них обычно предусматривается автоматическое переключение потока жидкости на запасную емкость.

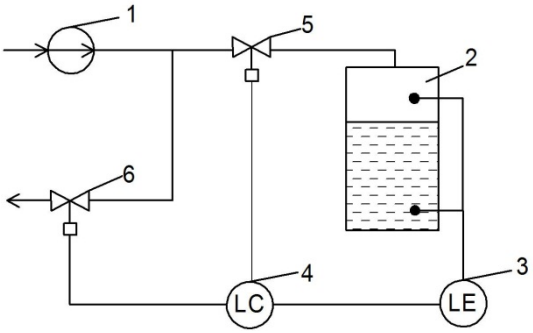



Рис. 7.16. Схема позиционного регулирования уровня: *1* – насос; *2* – аппарат; *3* – сигнализатор уровня; регулятор уровня; *5*, *6* – регулирующие клапаны

Способ непрерывного регулирования используется для стабилизации уровня на заданном значении, т. е. когда необходимо обеспечивать равенство $L = L_0$. Особенно высокие требования предъявляются к точности регулирования уровня в теплообменных аппаратах, в которых уровень конденсата определяет фактическую поверхность теплообмена. В таких АСР для регулирования уровня без статической погрешности применяют П-регуляторы. П-регуляторы используют лишь в тех случаях, когда не требуется высокое качество регулирования и возмущения в системе, не имеют постоянной составляющей, которая может привести к накоплению статической погрешности.

При отсутствии фазовых превращений в аппарате уровень в нем регулируют одним из трех способов: изменением расхода жидкости на входе в аппарат (регулирование «на притоке», рис. 7.17, *а*); изменением расхода жидкостей на выходе из аппарата (регулированием «на стоке», рис. 7.17, *б*); регулированием соотношения расхода жидкости на входе в аппарат и выходе из него с коррекцией по уровню (каскадная АСР, рис. 7.17, *в*).

Следует отметить, что при реализации каскадной АСР отклонение корректирующего контура может привести к накоплению ошибки при регулировании уровня, так как вследствие неизбежных погрешностей в настройке регулятора соотношение расхода жидкости на входе и выходе аппарата не будет одинаково и вследствие свойств объекта уровень в аппарате будет непрерывно нарастать (или убывать).

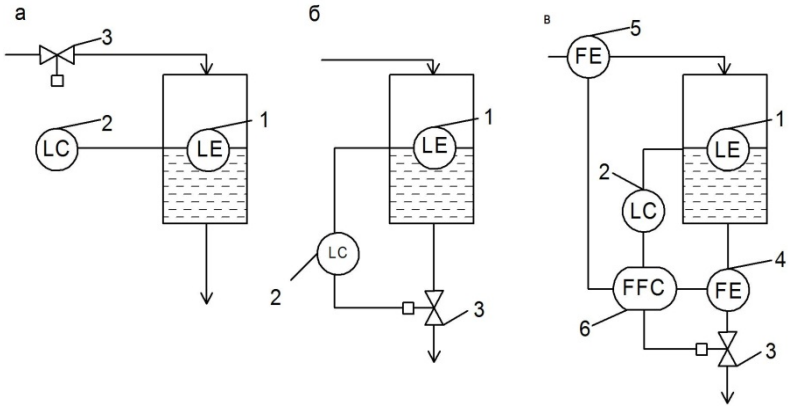



Рис. 7.17. Схемы непрерывного регулирования уровня: *а* – регулирование «на притоке»; *б* – регулирование «на стоке»; *в* – каскадная АСР; *1* – измеритель уровня; *2* – регулятор уровня; *3* – регулирующий клапан; *4, 5* – измерители расхода; *6* – регулятор соотношений

В случае, когда процессы в аппарате сопровождаются фазовыми превращениями, можно регулировать уровень изменением подачи теплоносителя (или хладагента). В таких аппаратах уровень взаимосвязан с другими параметрами (например, давлением), поэтому выбор способа регулирования каждом конкретном случае должен выполняться с учетом остальных контуров автоматического регулирования.

Регулирование уровня в инженерных системах применяют для ав-

томатизации водонапорных, подпиточных, расширительных, пневмогидравлических и других баков и резервуаров, а также для предупредительной и аварийной сигнализации переполнения или опорожнения различных емкостей.

Наиболее простым является поплавковый камерный регулятор уровня, состоящий из поплавковой камеры и регулирующего клапана, соединенных тягой (рис. 7.18). Поплавковая камера соединена с емкостью, находящейся под давлением до 16 кгс/см$^2$ (1,6 МПа).

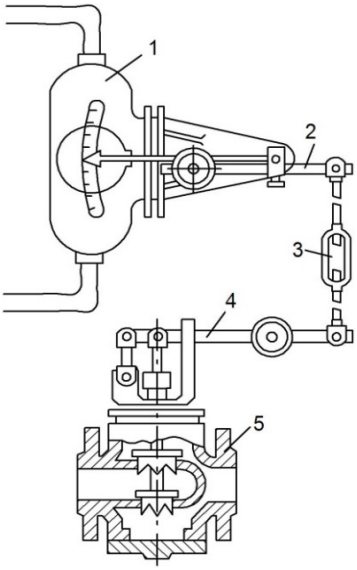



Рис. 7.18. Поплавковый камерный регулятор уровня: *1* – камера; *2, 4* – рычаг; *3* – тяга; *5* – регулирующий клапан

Шаровой пустотелый поплавок жестко связан с осью, выведенной через сальник, установленный в корпусе камеры. На этой же оси снаружи закреплен рычаг *2* с контргрузом и тягой, соединенной с рычагом *4* регулирующего клапана. Полный ход поплавка составляет 160 мм. Длину рычагов поплавкового устройства и клапана можно регулировать в больших пределах и тем самым изменять зону неравномерности регулятора от 10 до 500 %.

Поплавковые камерные регуляторы уровня жидкости можно комплектовать пневматическими или электрическими регулирующими и

сигнализирующими устройствами, которые крепят к корпусу поплавковой камеры и соединяют с рычагом. Пневматические регулирующие устройства представляют собой П-регуляторы, электрические – трехпозиционные контактные. В качестве регуляторов уровня могут применяться и диафанометры, оснащенные различными регулирующими устройствами.

Получили распространение также пневматические регуляторы уровня, которые по принципу действия близки к поплавковым мерным регуляторам. Их выпускают на условные давления 16, и 64 кгс/см$^2$ (1,6; 4,0 и 6,4 МПа); пределы измерения от 400 до 800 мм. Эти регуляторы оснащены указателями положения уровня и могут иметь две пневмосистемы, одна из которых служит для дистанционной передачи (до 300 м) показаний уровня класс точности 2,5), а другая – для регулирования. Чувствительный элемент представляет собой полый цилиндрический буек, соединенный рычагами и осью с заслонкой пневматического усилителя – преобразователя типа сопла-заслонки.

Для автоматизации откачивающих или нагнетающих насосов для сигнализации используются различные реле уровня. Реле уровня бессальниковое (рис. 7.19, *а*) имеет поплавковую камеру, которой вместе с уровнем жидкости перемещается шаровой поплавок, связанный штоком с осью. При перемещении поплавок поворачивает ведущий магнит муфты. Ведомый магнит поворачивается за ведущим магнитом и приводит в движение связанные с ним два ртутно-стеклянных контакта, которые срабатывают в крайних (верхнем и нижнем) положениях поплавка. Пределы срабатывания реле можно настроить от 20 до 150 мм, при этом один контакт будет срабатывать при максимальном уровне, другой – при минимальном. Разрывная мощность контактов В – А при переменном токе 220 В частотой 50 Гц. Электрическая проводка вводится через сальник корпуса контактного устройства. Реле можно использовать для резервуаров, находящихся под давлением. Его отличительной особенностью является бессальниковое устройство с электромагнитной связью.

Для открытых резервуаров большой высоты (до нескольких метров) применяется реле уровня (рис. 7.19, *б*), у которого поплавок соединен с контактным устройством с помощью троса, поплавок и противовес укреплены на тросе, перекинутом через блок. При перемещении поплавка вверх до максимального значения уровня кольцо *3*, укрепленное на тросе, подходит к рычагу контактного устройства и поднимает его. Контактное устройство срабатывает. При понижении уровня жидкости кольцо *6*, укрепленное на другом конце троса, пере-

мещает рычаг в обратном направлении до нового срабатывания контактного устройства. Прямое обратное срабатывание контактного устройства настраивается перемещением колец вдоль троса. Разрывная мощность контактов составляет до 2 кВА при переменном токе 220 В частотой 50 Гц.

Описанные поплавковые реле и регуляторы уровня не могут применяться для регулирования или сигнализации бытовых сточных вод, так как поплавковые устройства теряют плавучесть, механизмы передачи выходят из строя. Для этого разработано специальное реле уровня колодцев.

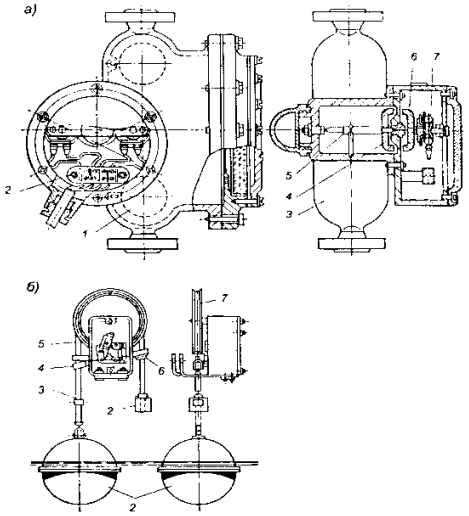



Рис. 7.19. Поплавковое реле уровня: *а* – бессальниковое с электромагнитной связью; *1* – поплавок; *2* – контактна колодка; *3* – камера; *4* – ведущий магнит; *5* – ось; *6* – ведомый магнит; *7* – ртутно-стеклянный контакт; *б* – для открытых резервуаров; *1* – поплавок; *2* – противовес; *3, 6* – кольца; рычаг; *5* – трос; *7* – блок

Большое распространение в инженерных системах получили неэлектрические и электронные реле уровня, использующие в качестве датчиков электроды, с помощью которых измеряется электропроводность или электрическая емкость. Эти реле не имеют подвижных устройств, поплавков и передаточных механизмов. Например, электрический регулятор – сигнализатор уровня предназначен для воды и

неагрессивных растворов. В основу работы заложен принцип замыкания электрической цепи при резком изменении электропроводности.

## 7.6. Автоматическое регулирование с помощью микропроцессоров

В последнее время в локальных АСР стала применяться вычислительная техника. На ее основе выпускаются программируемые микропроцессорные регуляторы. Один такой регулятор может заменить несколько десятков обычных электрических регуляторов. Микропроцессорный регулятор имеет 64 входа для присоединения измерительных устройств и столько же выходов для управления исполнительными механизмами. Входным сигналом программируемого микропроцессорного регулятора является постоянный ток, изменяющийся в диапазоне 0–5 мА (унифицированный сигнал). Поэтому измерительная цепь любого технологического параметра должна включать нормирующий преобразователь. Например, если регулируемый параметр – температура, то измерительная цепь составляется из термометра сопротивления и преобразователя НП-СЛ-1М (рис. 7.20, *а*) или из термопары и преобразователя НП-ТЛ-1М (рис. 7.20, *б*). При регулировании расхода измерительная цепь будет включать диафрагму и диафанометр с токовым выходом ДМ-Э (рис. 7.20, *в*) или ротаметр РЭД и преобразователь НП-ПЗ (рис. 7.20, *г*).

Применение микропроцессорного регулятора не устраняет необходимости в приборах для регистрации регулируемых параметров. По этим приборам ведут настройку регуляторов и при необходимости ручное дистанционное управление процессом. Унификация входных сигналов микропроцессорного регулятора позволяет применять однотипные одно-и многоточечные приборы типа КСУ для измерения постоянного тока в диапазоне 0–5 мА.

Так как выходные сигналы вычислительного устройства также имеют цифровую форму, то для их преобразования в выходные аналоговые сигналы на выходе регулятора имеются преобразователи двух видов. Одни из них – цифроаналоговые ЦАП – преобразуют цифровой выходной сигнал вычислительного устройства в постоянный ток с диапазоном изменения 0–5 мА, другие – цифроимпульсные ЦИП – в электрические импульсы различной длительности.

Рис. 7.20. Примеры измерительных цепей микропроцессорного регулятора: *а* – с термометром сопротивления; *б* – с термопарой; *в* – с диафрагмой; *г* – с ротаметром

Входные сигналы микропроцессорного регулятора поступают на коммутатор К, который поочередно подключает их к аналого-цифровому преобразователю АЦП. Частота работы коммутатора и очередность опроса входных сигналов вводятся оператором в вычислительное устройство с пульта ПО. Коммутатор подключает входные сигналы на короткие промежутки времени (десятки микросекунд). За это время входной сигнал обрабатывается в вычислительном устройстве по заданному закону регулирования и выдается на соответствующий выход регулятора. Таким образом, каждый вход и соответствующий ему выход относятся к одному контуру регулирования, а весь многоканальный регулятор представляет собой совокупность отдельных простых регуляторов.

В микропроцессорном регуляторе предусмотрен универсальный закон регулирования – ПИД – закон, из которого выбором коэффициентов при П-, И- и Д-составляющих можно получать любой требуемый для данной АСР типовой закон регулирования. Это производит оператор путем задания с пульта ПО требуемых коэффициентов для каждого канала многоканального регулятора.

Микропроцессорный регулятор позволяет также производить нелинейные преобразования сигналов (например, возведение в квадрат сигнала расходомера переменного перепада давления), сигнализировать превышение максимально допустимой величины рассогласова-

ния, организовывать связи между отдельными каналами для реализации комбинированных АСР. Все эти возможности оператор может реализовать путем ввода с пульта определенных команд.

Для повышения надежности многоканального регулятора в нем предусмотрено «горячее» резервирование: при возникновении неисправности в одном из каналов регулирования автоматически включается в работу резервный канал. Неисправность выявляется самим регулятором без участия оператора.

Применение коммутатора К позволило использовать для всех каналов один АЦП. На выходе микропроцессорного регулятора коммутация сигналов не предусмотрена, и общее число ЦАП и ЦИП равно числу выходных цепей. Это связано с тем, что при использовании одного ЦАП или одного ЦИП пришлось бы применить специальные устройства для сохранения выходных сигналов на время, пока коммутатор подключается к другим выходам.

Цифроаналоговые выходные преобразователя ЦАП предназначены для управления пневматическими исполнительными механизмами, которые подключают к выходу через электропневматический преобразователь ЭПП-63 и байпасную панель дистанционного управления БПДУ. Эта панель позволяет подавать на исполнительный механизм командное давление сжатого воздуха $p_к$ в диапазоне от 0,2 до $1 \cdot 10^5$ Па. Цифроимпульсные преобразователи ЦИП предназначены для управления электрическими исполнительными механизмами (ЭИМ), которые подключают к выходу через тиристорные пускатели.

В микропроцессорном регуляторе все операции с сигналами АСР (вычисление рассогласования, выработка регулирующего воздействия в соответствии с законом регулирования, выполнение математических операций и т. п.) производятся в цифровой форме. В этом случае говорят о непосредственном цифровом управлении процессом (НЦУ). Пульт оператора имеет клавиши с надписями, принятыми для регулирующих устройств. Это позволяет оператору общаться с регулятором, представляющим фактически микро ЭВМ, на понятном ему языке.

## 7.7. Регулирующие органы и механизмы

Регулирующий орган осуществляет регулирующее воздействие на объект изменением расхода вещества или энергии, подводимой к нему. Для изменения расхода жидкостей, газов и паров применяют дроссельные регулирующие органы. Их действие основано на изменении проходного сечения трубопровода в месте установки регулирующего

органа. Проходное сечение дроссельного регулирующего органа изменяют, открывая или закрывая его. Расход вещества через такой регулирующий орган зависит от степени его открытия и перепада давлений на нем. Поэтому следует иметь в виду, что даже при одной и той же степени открытия дроссельного регулирующего органа расход через него может изменяться при изменении перепада давлений.

К дроссельным регулирующим органам относятся односедельные, двухседельные и диафрагмовые клапаны, а также заслонки. В односедельных и двухседельных регулирующих клапанах (рис. 7.21) изменение проходного сечения производится перемещением одного или двух плунжеров *2* относительно седла *3*. Преимущество односедельного клапана перед двухседельным в том, что он обеспечивает при закрытии герметичное перекрытие трубопровода, в то время как у двухседельного невозможно обеспечить герметичную посадку в седла одновременно обоих плунжеров. С другой стороны, перепад давлений на клапане создает на плунжере односедельного клапана выталкивающее усилие, достигающее максимальной величины при полностью закрытом клапане.

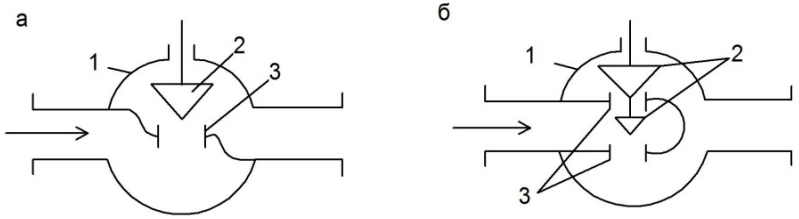



Рис. 7.21. Регулирующие клапаны: *а* – односедельный; *б* – двухседельный; *1* – корпус; *2* – плунжер; *3* – седло

У двухседельного клапана такие силы приложены к обоим плунжерам, но направлены в разные стороны. Поэтому результирующее усилие на штоке такого клапана даже при полном закрытии гораздо меньше, чем у односедельного, и для перемещения двухседельного клапана требуется исполнительный механизм меньшей мощности, чем для односедельного. В диафрагмовых клапанах (рис. 7.22) проходное сечение изменяется в результате перемещения центра диафрагмы *2* относительно перегородки *3* в корпусе клапана *1*.

В трубопроводах большого сечения для управления потоками газа и пара обычно применяют *поворотную заслонку* (рис. 7.23).

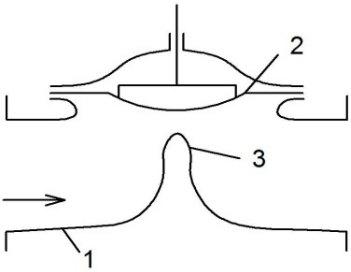



Рис. 7.22. Диафрагмовый клапан

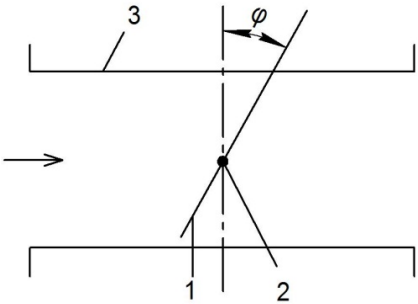



Рис. 7.23. Поворотная заслонка

Основной элемент заслонки – круглый диск *1*, укрепленный на оси *2* и помещенный в корпусе *3*. Поворотом диска изменяется площадь проходного сечения между заслонкой и корпусом. Если диск находится в плоскости, перпендикулярной оси корпуса, то проходное сечение равно нулю. По мере поворота диска площадь проходного сечения увеличивается и достигает максимума, когда положение диска совпадает с осью корпуса.

Основной характеристикой дроссельного регулирующего органа как элемента АСР является его статическая характеристика – зависимость расхода вещества через регулирующий орган от степени его открытия.

Для регулирующего органа предпочтительна линейная статическая характеристика, так как только в этом случае не искажается закон регулирования, формируемый регулятором в АСР. Однако, как указывалось выше, расход через дроссельный регулирующий орган зависит еще и от перепада давлений, который в технологическом процессе может изменяться с изменением расхода. Поэтому статическая характеристика регулирующего органа, линейная при постоянном перепаде давлений, может оказаться нелинейной в реальных условиях.

Чтобы избежать этого, применяют клапаны не только с линейными, но и с нелинейными характеристиками при постоянном перепаде давлений. Таким образом, удается скомпенсировать нелинейность статической характеристики регулирующего органа, обусловленную переменным перепадом давлений.

Для дроссельных регулирующих органов необходимая статическая

характеристика наиболее просто может быть получена у регулирующего клапана. В настоящее время промышленность выпускает регулирующие клапаны с линейной, логарифмической и параболической характеристиками, причем клапаны с различными характеристиками отличаются лишь формой плунжера.

Кроме статической характеристики, регулирующий клапан характеризует его *пропускная способность* – расход воды через полностью открытый регулирующий орган при перепаде давлений на нем $1 \cdot 10^5$ Па. Этот расход (в $м^3$/ч) указывается в паспортных данных регулирующего органа вместе с другими его показателями: условным давлением, допустимой температурой и т. п.

Регулирующий орган выбирают по пропускной способности, виду требуемой статической характеристики, а также исходя из условий его эксплуатации: свойств протекающей среды, температуры и давления в трубопроводе.

Для трубопроводов небольшого диаметра (до 25 мм) применяют односедельные регулирующие клапаны, большого диаметра – двухседельные. В тех случаях, когда условия эксплуатации не позволяют применять регулирующие клапаны, используют диафрагмовые клапаны сильноагрессивных жидкостей. Диафрагмы в таких клапанах изготавливают из кислотостойкой резины, фторопласта и других материалов, стойких по отношению к протекающей среде, а внутреннюю поверхность корпуса покрывают фторопластом или эмалью.

# 8. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

## 8.1. Функции элементов автоматики

Любые простые и сложные устройства автоматики состоят из отдельных связанных между собой элементов. *Элементом автоматики* называется часть устройства автоматической системы, в которой происходят качественные или количественные преобразования физической величины. Поскольку элементы отдельного устройства взаимосвязаны между собой, то второй задачей элементов автоматики является передача преобразованного воздействия от предыдущего звена к последующему. В общем виде любой элемент автоматики можно представить как преобразователь энергии, на вход которого подается некоторая величина $x$, а с выхода снимается величина $y$ (рис. 8.1). Величина $x$ называется входным, а величина $y$ – выходным сигналом элемента автоматики. В некоторых элементах величина $x$ преобра-

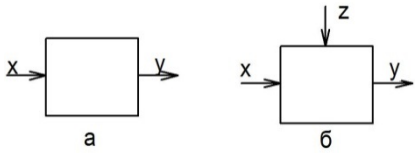



Рис. 8.1. Общее обозначение элементов автоматики: *а* – без дополнительного источника энергии; *б* – с дополнительным источником энергии

зуется в величину *y* за счет энергии, получаемой от входной величины *x*. В других элементах для этого преобразования необходим дополнительный источник энергии *z*. Классификация устройств и элементов автоматики обычно производится по их функциональному назначению и по виду энергии на входе и выходе. По функциональному назначению в устройствах автоматики выделяют следующие основные элементы: датчики, усилители, стабилизаторы, реле, распределители, двигатели, исполнительные элементы, логические и функциональные элементы.

*Датчиком* называется устройство, преобразующее контролируемую или управляемую величину в выходной сигнал, удобный для передачи и дальнейшей обработки. Выходной сигнал электрического датчика может представлять собой электрическую величину (ток или электродвижущая сила) или параметр электрической цепи: активное, индуктивное или емкостное сопротивление.

По структуре датчики состоят из одного или нескольких элементарных преобразователей, в которых происходит преобразование одной физической величины в другую или количественное изменение одной и той же физической величины. Важнейшим из элементарных преобразователей является первый, воспринимающий контролируемую величину.

Его называют воспринимающим органом или чувствительным элементом, а иногда измерительным органом. *Усилителем* называется устройство, которое, не изменяя физической природы входного сигнала, производит лишь усиление его, т. е. увеличение его до требуемых значений. Обычно величина выходной энергии датчика недостаточна для управления последующими звеньями автоматики, поэтому между датчиком и последующим звеном необходим усилитель. Эффект усиления выходной величины в этом случае происходит за счет энергии другого источника.

*Стабилизатором* называется устройство, которое автоматически поддерживает постоянное значение выходной величины *y* независимо от изменений входной величины *x* в определенных пределах.

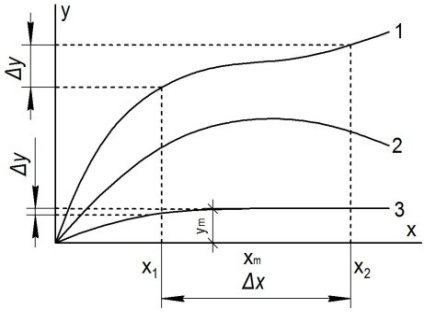


Рис. 8.2. Характеристики стабилизатора

Различные виды характеристик стабилизаторов показаны на рис. 8.2. Чем ближе участок характеристики, соответствующий изменению входной величины $x$, к горизонтальной прямой, тем точнее и лучше стабилизация. В устройствах автоматики широко используют стабилизаторы постоянных и переменных напряжений и токов. Существуют также стабилизаторы температуры, скорости, магнитного потока и других параметров.

*Реле* называется устройство, в котором при достижении определенного значения входной величины $x$ выходная величина $y$ изменяется скачком и принимает конечное число значений. При изменении входной величины $x$ от нуля до $x_c$ выходная величина $y$ равна нулю. При $x = x_c$ происходит срабатывание реле, и выходная величина скачком изменяется от нуля до $y_1$. При дальнейшем увеличении $x$ выходная величина остается практически неизменной. Возврат реле происходит при $x = x_в$, и выходная величина скачком уменьшается до нуля (рис. 8.3).

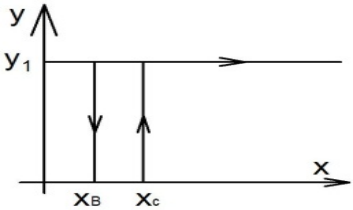


Рис. 8.3. Характеристика реле

*Распределителем* называется коммутационное устройство, которое последовательно во времени и в заданном порядке подключает одну электрическую цепь к ряду других цепей или наоборот. Широкое применение в устройствах автоматики и дистанционного управления нашли шаговые и синхронные распределители.

*Двигателем* называется устройство, в котором энергия того или иного вида преобразуется в механическую. В автоматике и телемеханике используются электрические, гидравлические и пневматические двигатели небольшой мощности. В автоматических системах двигатели часто являются составной частью исполнительных элементов и позволяют в широком диапазоне регулировать скорость или изменять направление вращения, а также перемещать регулирующие органы.

*Исполнительным элементом* называется устройство, осуществля-

ющее непосредственное воздействие на объект управления.

Исполнительные элементы с механическим выходом в виде перемещения регулирующего органа называют *исполнительным механизмом* (сервомотор, серводвигатель или сервопривод).

*Логическими и функциональными элементами* называются устройства, осуществляющие определенные логические и функциональные зависимости между входными и выходными величинами. Эти элементы обычно используют в схемах вычислительных машин, а также начинают применять в дискретных схемах автоматического контроля, защиты и управления.

## 8.2. Основные параметры элементов автоматики

Вес элементы автоматики представляют собой преобразователи энергии, на вход которых подается величина $x$, а с выхода снимается величина $y$. Для каждого элемента автоматики в установившемся режиме существует определенная зависимость $y = f(x)$ между входным сигналом $x$ и выходным $y$, называемая статической характеристикой элемента (рис. 8.4).

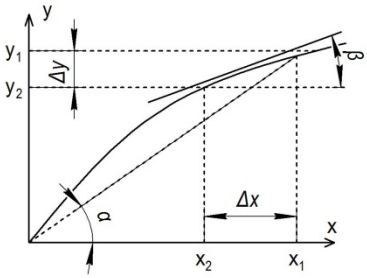



Рис. 8.4. Статическая характеристика элемента автоматики

Кроме того, элементам автоматики независимо от их назначения присущи общие параметры: передаточный коэффициент (чувствительность, коэффициент усиления, коэффициент стабилизации), погрешность, порог чувствительности, характеристики в статическом и динамическом режимах.

Передаточный коэффициент элемента представляет собой отношение выходной величины $y$ к входной $x$ или отношение приращения $\Delta y$ к приращению $\Delta x$.

Передаточный коэффициент в первом случае называется статическим передаточным коэффициентом:

$$k_{\text{с}} = \frac{y_1}{x_1}, \tag{8.1}$$

а во втором – динамическим:

$$k_{д} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx}. \qquad (8.2)$$

При линейной статической характеристике элемента автоматики эти коэффициенты постоянны и равны между собой при всех значениях $x$ и $y$. Численное значение их при одинаковых масштабах по осям $x$ и $y$ равняется тангенсу угла наклона характеристики: $k_{с} = \text{tg}\ \alpha$ и $k_{д} = \text{tg}\ \beta$.

Размерность передаточного коэффициента определяется отношением размерностей входной и выходной величин. Например, для усилителя и стабилизатора он будет безразмерным, а для индуктивного датчика перемещения – размерным (В/см), поскольку размерность входной величины – см, а выходной – *В*.

В некоторых случаях, когда более удобно иметь безразмерный передаточный коэффициент, используют относительный передаточный коэффициент:

$$\eta = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x} = \frac{\Delta y \cdot x}{\Delta x \cdot y}. \qquad (8.3)$$

Знак передаточного коэффициента может быть положительным или отрицательным, в зависимости от вида характеристики элемента.

Статические характеристики элементов автоматики по виду можно разделить на три группы: линейная, у которой динамический коэффициент положителен для всех значений $x$; нелинейная непрерывная и нелинейная разрывная (рис. 8.5).

Применительно к датчикам и некоторым другим элементам статические и динамические передаточные коэффициенты называют статическими и динамическими коэффициентами чувствительности, а применительно к усилителям – коэффициентами усиления.

Для стабилизаторов принимается во внимание обычно относительный коэффициент стабилизации, который представляет собой отношение относительного изменения входной величины к относительному изменению выходной величины:

$$S = \frac{\frac{\Delta x}{x}}{\frac{\Delta y}{y}} = \frac{\Delta x \cdot y}{\Delta y \cdot x}. \qquad (8.4)$$

Как видно из выражений, коэффициент стабилизации есть обратная величина относительного передаточного коэффициента, т. е.

$$S = \frac{1}{\eta}. \tag{8.5}$$

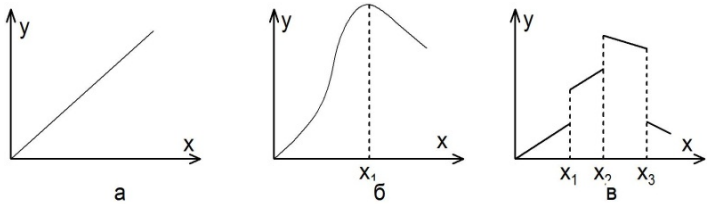



Рис. 8.5. Разновидности статических характеристик элементов автоматики:
*а* – линейная $k_c = k_д = \text{const}$; *б* – нелинейная непрерывная $k_c \neq k_д \neq \text{const}$;
*в* – нелинейная разрывная $k_c \neq = k_д \neq \text{const}$

*Погрешностью* называется отклонение выходной величины *y* от ее расчетного значения вследствие изменения внутренних свойств элемента (износ, старение) и внешних условий (изменение напряжения питания, температуры окружающей среды и т. п.). При оценке элементов автоматики, как и в измерительной технике, используют абсолютную и относительную погрешности.

В зависимости от причин, вызывающих погрешности, различают температурные, конструктивные, погрешности от колебания напряжения и др.

В одних устройствах при небольшом изменении входной величины выходная остается неизменной. Это явление объясняется наличием в отдельных узлах элементов трения, свободного хода (люфта), гистерезиса и т. п. Количественная сторона этого явления оценивается величиной порога чувствительности, под которым понимают наименьшее значение входной величины, способное вызвать изменение выходной величины (рис. 8.6).

В других устройствах автоматики при постоянстве входной величины возникают самопроизвольные изменения выходной. Это объясняется внешними влияниями (изменение условий окружающей среды) и внутренними (например, старение элементов). Нестабильность выходной величины при постоянстве входной величины применительно к назначению элемента автоматики называют по-разному: помехи, шумы, плавание, дрейф и т. п.

Выше рассматривались характеристики элементов автоматики при неизменных величинах *x* и *y* во времени, т. е. в статическом режиме.

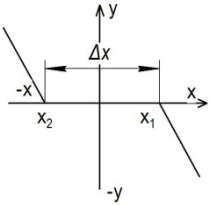



Рис. 8.6. Порог чувствительности:
$x_1$ и $x_2$ – значения порога чувствительности;
$\Delta x = /x_1/ + /x_2/$ – зона нечувствительности

Условия работы элемента автоматики, когда его входная величина $x$ и выходная величина $y$ являются не установившимися, а изменяются во времени, называют *динамическим режимом.*

Поскольку элементы автоматики, как правило, обладают определенной инерционностью, то выходная величина изменяется с некоторым запаздыванием по отношению к изменению входной величины. Инерционные свойства элементов определяют работу систем автоматики в динамическом режиме и имеют решающее значение при анализе качественной и количественной сторон работы устройств автоматики. После скачкообразного изменения входной величины (рис. 8.7, *а*) выходная величина достигает своего установившегося значения не сразу, а через некоторое время, в течение которого в элементе происходит переходный процесс. Как известно, переходный процесс может быть затухающим апериодическим (рис. 8.7, *б*) или затухающим колебательным (рис. 8.7, *в*).

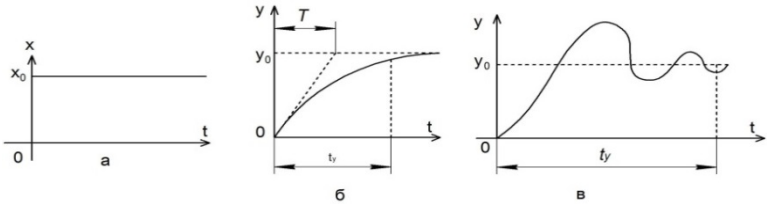



Рис. 8.7. Графики переходного процесса в элементе автоматики: *а* – скачкообразное изменение входной величины; *б* – апериодический переходный процесс; *в* – колебательный переходный процесс

Разность между значениями выходной величины в динамическом и в новом, установившемся режимах, называется *динамической погрешностью.* Для практических целей желательно стремиться к тому, чтобы динамическая погрешность была минимальной.

В зависимости от функций, выполняемых специальными автоматическими устройствами, различают следующие основные виды автома-

тизации: автоматический контроль, автоматическая защита и автоматическое управление.

Автоматический контроль включает автоматические сигнализацию, измерение, сортировку и сбор информации.

Автоматическая сигнализация предназначена для оповещения обслуживающего персонала о предельных или аварийных значениях каких-либо физических параметров, о месте и характере нарушений технологического процесса.

Автоматическое измерение предназначено для измерения и передачи на специальные указательные или регистрирующие приборы физических величин, характеризующих технологический процесс или работу машин. Обслуживающий персонал по показаниям приборов судит о качестве технологического процесса или о режиме работы машин и агрегатов.

Автоматическая сортировка предполагает контроль и разделение продукции по размеру, весу, твердости, вязкости и другим показателям (например, сортировка зерна, яиц, фруктов, картофеля и т. п.).

Автоматический сбор информации предназначен для получения информации о ходе технологического процесса, о качестве и количестве выпускаемой продукции, для обработки и выдачи информации обслуживающему персоналу.

Автоматическая защита представляет собой совокупность технических средств, которые при возникновении ненормальных и аварийных режимов либо прекращают контролируемый производственный процесс (например, отключают определенные участки электроустановки при возникновении на них коротких замыканий), либо автоматически устраняют ненормальные режимы. Автоматическая защита очень тесно связана с автоматическим управлением и сигнализацией. Она воздействует на органы управления и оповещает обслуживающий персонал об осуществленной операции. Защиту, выполняемую на реле, называют *релейной защитой*. Релейная защита широко применяется на электрических станциях, подстанциях, в сетях и различных электроустановках.

Автоматическая защита включает также автоблокировку. Устройства автоблокировки в основном предназначены для предотвращения неправильных включений и отключений оборудования и тем самым предупреждают повреждения и аварии.

## 8.3. Элементы автоматики

Каждая из систем автоматики состоит из функциональных блоков и узлов, комплектуемых, в свою очередь, из отдельных элементов и приборов. Они характеризуются разнообразием принципов действия, конструктивным исполнением, степенью надежности, сроком службы и пр. Прежде чем перейти к рассмотрению конкретных устройств, применяемых для автоматизации мелиоративных систем, следует выделить основные функциональные узлы и элементы и выяснить их общие характеристики.

По выполняемым функциям основные элементы автоматики обычно подразделяют на следующие виды: датчики, реле, усилители, стабилизаторы, распределители, генераторы импульсов и двигатели. Применяются также выпрямители, преобразователи, фазочувствительные схемы и целый ряд других устройств.

*Датчиками* (измерительными элементами) называют элементы, служащие, как правило, для качественного преобразования входной (регулируемой, контролируемой или измеряемой) величины в другую величину, наиболее удобную для последующей передачи по цепи системы автоматики. В мелиоративных системах в большинстве случаев применяются датчики измерения неэлектрических величин: расхода воды, уровня, температуры, давления, влажности и т. п. Эти величины преобразуются в электрические, удобные для передачи на расстояние или для использования в местных электрических устройствах автоматики.

Выходная величина датчика может представлять собой какой-нибудь параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, емкость и др. В таких датчиках изменение параметров электрической цепи вызывает модуляцию величины и характера изменения тока или напряжения постороннего источника. Поэтому такие датчики называют параметрическими или датчиками-модуляторами.

Если же входная величина датчика преобразуется в величину ЭДС (электродвижущей силы), то такой датчик называется *генераторным*.

В применяемых нами устройствах автоматики контролируемая величина не всегда воздействует непосредственно на датчик. Обычно входная величина преобразуется в первичном измерителе в другую неэлектрическую величину (в большинстве случаев – в механическое перемещение), а затем уже в электрическую. Например, во всех первичных измерителях давления, температуры, уровня эти величины преобразуются в угловое или поступательное перемещение, которое в

свою очередь преобразуется в изменение электрического параметра.

Большинство современных датчиков имеет выходной сигнал в непрерывной (аналоговой) форме. Развитие цифровой техники обусловило применение датчиков дискретного действия, имеющих цифровые выгодные сигналы. Для этого первичные измерители соединяются с преобразователями, которые превращают непрерывную величину (напряжения или угла поворота), пропорциональную измеренному параметру, в соответствующие числовые эквиваленты.

Реле – наиболее распространенный элемент автоматики. Так называют элемент, в котором выходная величина $y$ меняется скачкообразно при достижении входной величиной $x$ определенных значений. Характеристика релейного элемента приведена на рис. 8.8, *а*. Изменение выходной величины скачком от $y_1$ до $y_2$ называется *срабатыванием реле*, а величина $x_2$ – *величиной срабатывания*. Аналогично скачкообразное изменение величины $y$ от $y_2$ до $y_1$ называется *отпусканием реле*, а величина $x_1$ – *величиной отпускания*. Обычно $x_1 < x_2$, а отношение $\frac{x_1}{x_2}$ называется *коэффициентом возврата реле*.

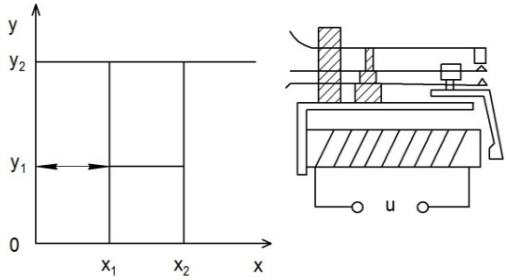



Рис. 8.8. Релейный элемент: *а* – характеристика реле;
*б* – конструктивная схема электромагнитного реле

Как видно из характеристики, реле служат для получения дискретных фиксированных значений величин. Реле часто используются для усиления мощности; мощность срабатывания обычно во много раз меньше мощности, управляемой при помощи реле. Кроме того, одно реле может осуществлять управление большим количеством элементов и цепей автоматики.

В современной практике преимущественно применяются реле, основанные на электромеханическом принципе действия. Изменению входной электрической величины в них соответствует механическое

перемещение якоря, что приводит к изменению положения контактов (рис. 8.8). Однако теперь все более широкое применение находят бесконтактные реле, обладающие по сравнению с электромеханическими рядом преимуществ.

*Усилителями* называют элементы, служащие для усиления входной величины. Необходимость в усилении обусловлена тем, что в ряде элементов энергия выходной величины недостаточна для управления последующим в цепи автоматики элементом.

Усилители бывают как электрические, так и неэлектрические. Для автоматизации мелиоративных систем, наряду с электрическими и магнитными усилителями, применяются также гидравлические усилители, в частности использующие перепад уровней воды между каналами различных порядков. В общем, в основу процесса усиления положен ряд физических принципов, в соответствии с чем различают гидравлические, электронные, магнитные, полупроводниковые, электромеханические и электромашинные усилители.

*Стабилизаторами* называют элементы, в которых при изменении входной величины в определенных пределах выходная величина остается постоянной или изменяется незначительно. В системах автоматики часто необходимо стабилизировать напряжение или ток, в соответствии с чем различают стабилизаторы тока или напряжения. В общем виде схема электрического стабилизатора представлена на рис. 8.9.

В стабилизаторе тока при постоянстве входного напряжения $u_1$ и изменении сопротивления $z$ величина $l_2$ остается постоянной; в стабилизаторе напряжения при изменении $u_1$ остается постоянным выходное напряжение $u_2$. *Распределителем* называют элемент автоматики, в котором происходит поочередное подключение одной цепи к ряду других. В системах автоматики необходимость поочередного подключения возникает при управлении многими элементами или при контроле многих элементов с помощью одного устройства. Существует большое количество различных типов распределителей. Преимущественное применение нашли электромеханические шаговые распределители, распределители, собранные на электромагнитных реле, и бесконтактные быстродействующие распределители.

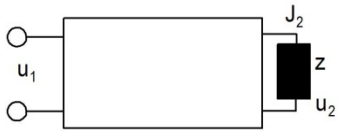


Рис. 8.9. Схема электрического стабилизатора тока или напряжения

Генераторы импульсов, как это следует из названия, предназнача-

ются для генерирования импульсов различной формы и частоты, в зависимости от требований, предъявляемых к ним устройствами автоматики. Генераторы импульсов нашли особенно широкое применение в телемеханике. Различают релейно-контактные и различные бесконтактные генераторы импульсов, построенные с применением электронных и ионных приборов, транзисторов и т. д.

Электродвигатели применяют в качестве исполнительных механизмов. Для привода подъемных механизмов затворов преимущественно используют асинхронные короткозамкнутые двигатели. На насосных станциях применяют асинхронные короткозамкнутые и синхронные низковольтные и высоковольтные двигатели. Используют также маломощные индукционные двухфазные конденсаторные двигатели и однофазные синхронные. Регулирование оборотов, как правило, не применяется.

## 8.4. Характеристики элементов автоматики

Как было установлено, всякая система автоматики состоит из отдельных элементов, отличающихся как по выполняемым ими функциям, так и по принципу их действия. Однако многие определения и характеристики являются общими для всех элементов или для больших их групп.

Пусть на вход элемента подается величина $x$, а на выходе получается величина $y$. Связь между зависимой переменной у и аргументом $xy = f(x)$ определяется задачей, выполняемой элементом. Одни элементы должны только количественно преобразовывать входную величину, другие – еще и качественно. Например, входной величиной первичного измерительного элемента уровня воды является измеряемый уровень; выходной величиной может быть угол поворота выходной оси элемента, напряжение электрического тока и т. п.

Мы рассмотрим главным образом основные статические характеристики элементов, т. е. зависимости между величинами $y$ и $x$, при которых выходная величина $y$ зависит только от входной величины $x$ (но не от времени, как это наблюдается в переходных процессах). Режим, при котором действующие в системе сигналы не зависят от времени, называется *равновесным*.

Общей характеристикой любого элемента является коэффициент преобразования, или передаточный коэффициент, представляющий собой либо отношение выходной величины к входной, либо отношение их производных по времени. Соответственно различают статиче-

ский $k = \frac{y}{x}k$ и динамический $k^1 = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{dy}{dx}$ коэффициенты преобразования. Как тот, так и другой коэффициент может быть либо безразмерной величиной (если элемент осуществляет количественное преобразование), либо иметь размерность (если элемент осуществляет качественное преобразование).

Динамический коэффициент преобразования характеризует крутизну статической характеристики $y = f(x)$ и численно равен тангенсу угла наклона касательной в данной точке характеристики, т. е. $k^1 = \text{tg}\ \alpha$ (рис. 8.10). Значения статического и динамического коэффициентов меняются в зависимости от значения $x$ и не равны между собой. Исключение составляет лишь прямолинейная характеристика $y = cx$; в этом случае $k^1 = k = c$.

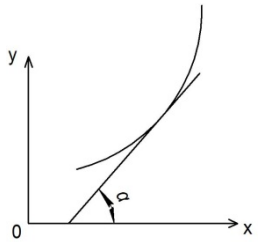



Рис. 8.10. Динамический коэффициент преобразования

*Относительным коэффициентом преобразования* называется отношение относительного приращения выходной величины к относительному приращению входной: $k_0 = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy \cdot x}{dx \cdot y} = \frac{k^1}{k}$. Как видно из приведенного определения, $k_0$ является безразмерной величиной; при прямолинейной статической характеристике $k_0 = 1$.

Коэффициент преобразования (передаточный коэффициент) имеет и другие, частные названия в зависимости от функций, выполняемых элементами. Так, применительно к усилителю говорят о коэффициенте усиления, в случае датчиков – о чувствительности элемента и т. п. Мы будем пользоваться обобщенным термином «коэффициент преобразования», указывая иногда дополнительно функциональное название.

Характерной величиной всякого элемента автоматики является также погрешность – отклонения выходной величины при одной и той же входной. Такие отклонения возникают вследствие изменения либо внутренних свойств элемента (старение материала, трение), либо внешних условий его работы (температура, напряжение питания и т. п.). Различают абсолютную и относительную погрешности. Абсолютная погрешность $\Delta y$ равна разности между фактическим $y$ и полученным ($y_2$ или $y_1$) значениями выходной величины (см. рис. 8.8, *а*). Очевидно, эта разность может быть положительной ($\Delta y = y_2 - y_1 > 0$) или отрицательной ($\Delta y = y_2 - y_1 < 0$). *Относительной погрешностью*

называется отношение абсолютной погрешности к расчетному значению выходной величины:

$$a = \frac{\Delta y}{y} \text{ или } a\ \% = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100\ \%. \qquad (8.6)$$

*Приведенной относительной погрешностью* называют отношение абсолютной погрешности к максимальному значению выходной величины:

$$b = \frac{\Delta y}{y_{\max}} \text{ или } b\ \% = \frac{\Delta y}{y_{\max}} \cdot 100\ \% \cdot \qquad (8.7)$$

Для оценки точности работы элементов автоматики обычно пользуются именно приведенной относительной погрешностью.

Погрешность характеризует разброс значений $y$ при одной и той же величине $x$. Итак, вследствие разброса одной и той же входной величине $x$ могут соответствовать различные значения $y$, заключенные между $y_1$ и $y_2$. Вместе с тем одной и той же величине $y$ могут соответствовать различные значения $x$ (рис. 8.11).

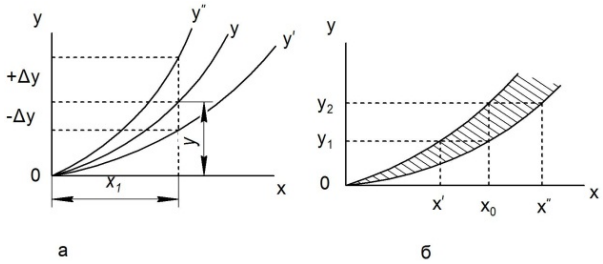



Рис. 8.11. Определение характеристик элемента:
*а* – погрешности; *б* – пороги чувствительности

Таким образом, в интервалах $x' - x_0$ и $x'' - x_0$ изменение входной величины может не вызывать изменения выходной величины. Этот интервал называется зоной нечувствительности. Значения ($x'$ и $x''$) входной величины, с которых она начинает изменяться (становится заведомо меньше $y_1$ или больше $y_2$), называются порогами чувствительности.

Широкое распространение в системах автоматики находит обратная связь, т. е. воздействие на вход элемента величины, пропорциональной выходной величине. На рис. 8.12 показано, что обратная связь осуществляется с помощью дополнительного элемента обратной связи

ОС. На вход элемента, помимо входной величины $x$, подается также величина $x_{о.с} = \beta y_1$. Множитель β называется коэффициентом обратной связи и может быть как положительным, так и отрицательным.

При наличии обратной связи величина сигнала на входе элемента равна $x + x_{о.с} = x + \beta y_1$, что больше $x$ при положительной обратной связи ($\beta > 0$) и меньше при отрицательной ($\beta < 0$).

Введение обратной связи изменяет коэффициент преобразования элемента. Если без обратной связи статический коэффициент преобразования был равен $k = \frac{y}{x}$, то с введением обратной связи имеем $k_{о.с} = \frac{y_1}{x}$, где по прямой связи

$$y_1 = k\,(x + x_{о.с}) = k\,(x + \beta\, y_1); \qquad (8.8)$$

отсюда

$$k_{о.с.} = \frac{y_1}{x} = \frac{k}{1-\beta k}. \qquad (8.9)$$

Из формулы видно, что с введением положительной обратной связи величина коэффициента преобразования увеличивается, а с введением отрицательной – уменьшается. Поэтому положительная обратная связь применяется в тех случаях, когда надо получить большие значения $y$ при малых значениях $x$.

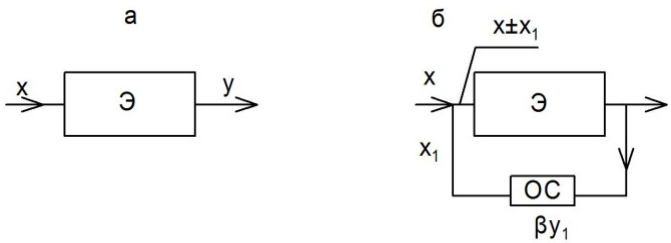



Рис. 8.12. Структурная схема элемента:
*а* – без обратной связи; *б* – с обратной связью

Однако введение обратной связи изменяет не только коэффициент преобразования, но и относительную погрешность. Положительная обратная связь повышает погрешность выходной величины, а отрицательная вместе с уменьшением коэффициента преобразования снижает и относительную погрешность выходной величины. Поэтому отрица-

тельная обратная связь применяется, когда требуется погрешность свести к минимуму. Так, отрицательная обратная связь применяется в системах автоматического регулирования, где требуется высокая устойчивость выходной величины.

## 8.5. Контактные и бесконтактные элементы

Элементы, которые используются в устройствах автоматики и телемеханики, делятся на два класса: контактные элементы с механическими, движущимися узлами и элементы без них – бесконтактные. К первому классу относятся все типы электромагнитных реле и контакторов, электромеханические командо-аппараты, путевые выключатели и ряд других электромеханических устройств. До последнего времени при автоматизации производственных процессов преимущественно применялась релейно-контактная аппаратура.

Характерным примером контактной аппаратуры являются электромагнитные реле. В настоящее время достигнуты большие успехи в конструктивном исполнении этих приборов и увеличении срока их службы. Например, низковольтные реле выдерживают до 5–10 млн. переключений, а допустимая частота включений достигает 1200–3600 в час. В последнее время осваиваются реле с контактами, заключенными в герметизированную стеклянную капсулу. Срок службы подобных реле достигает 10 млрд. и более срабатываний.

Одна из конструкций представляет собой язычковое реле, в котором контакты на якорьках из специального магнитного материала замыкаются под действием осевого магнитного поля. Однако реле такого типа пока очень дороги и не получили широкого распространения. В общем, несмотря на усовершенствования контактной аппаратуры, ей присущи принципиальные недостатки, которые если и будут преодолеваться, то с большим трудом: подвижная система подвержена износу; контакты разрушаются под действием электроэррозии; быстродействие электромагнитных реле ограничено и для целого ряда устройств недостаточно.

# 9. УСИЛИТЕЛИ, БЛОКИ СРАВНЕНИЯ, ЗАДАТЧИКИ, КОМАНДНЫЕ УСТРОЙСТВА

## 9.1. Полупроводниковые усилители

В полупроводниковых усилителях, как и в магнитных, широко используются отрицательные и положительные обратные связи. Отрицательная обратная связь уменьшает искажения выходного сигнала, улучшает частотную характеристику усилителя, способствует стабилизации его работы при замене транзисторов с производственным разбросом параметров и при изменении их характеристик в зависимости от температуры. Положительная обратная связь используется в основном для увеличения коэффициента усиления и перевода усилителя в релейный режим. В последнем качестве она применяется в бесконтактных полупроводниковых реле и нуль-органах.

*Нуль-органом* называют сравнивающий элемент автоматических устройств, формирующий сигнал или знак рассогласования сравниваемых величин. Кроме того, в измерительных устройствах он выдает визуальный сигнал и поэтому его чаще всего называют *нуль-индикатором.*

Нуль-индикатор должен реагировать на величину и знак разности двух сравниваемых электрических величин (токов или напряжений). Ток или напряжение на выходе нуль-индикатора при его срабатывании или возврате, как и у реле, изменяется скачкообразно.

Полупроводниковые нуль-индикаторы по сравнению с широко используемыми поляризованными и магнитоэлектрическими реле обладают некоторыми преимуществами. Их отличают высокие чувствительность и к. п. д., большой срок службы, значительная вибро- и ударостойкость. Ценное их качество – возможность бесконтактного управления непосредственно промежуточными реле с высокой коммутационной способностью контактов.

Принцип действия полупроводниковых нуль-индикаторов одинаков, но схемные решения могут быть различными. На рис. 9.1 показана схема нуль-индикатора с двумя устойчивыми состояниями: первое – реле разомкнуло свои контакты и ток реле равен $I_0$: второе – реле сработало и ток реле равен $I_р$. Схема работает следующим образом.

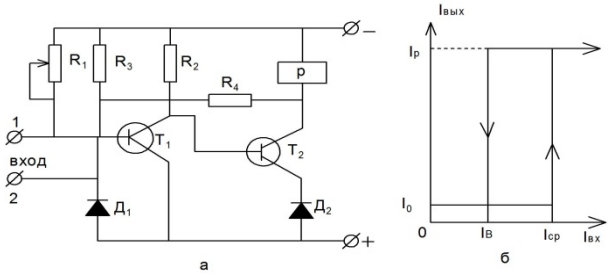
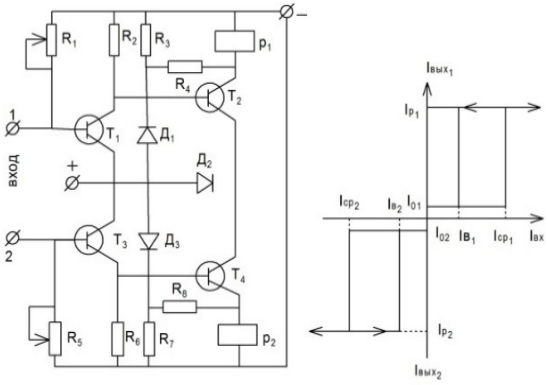



Рис. 9.1. Схема нуль-индикатора с двумя устойчивыми состояниями (*а*) и его характеристика (*б*)

На вход схемы к зажимам *1* и *2* подается сигнал рассогласования сравниваемых величин в виде малого тока или напряжения. При отсутствии входного сигнала триод $T_1$ открыт током, протекающим по цепи: эмиттер – база триода $T_1$ – резистор $R_1$. Вследствие этого потенциал базы триода $T_2$ имеет незначительную положительную величину относительно эмиттера этого же триода. Отрицательный потенциал смещения эмиттера создается падением напряжения в диоде $Д_2$ в прямом направлении. Благодаря этому $T_2$ закрыт, а через реле протекает незначительный ток $I_0$ = 20 – 50 мкА. Потенциалы входных зажимов *1* и *2* определяются соответственно падением напряжения в триоде $T_1$ от токов, протекающих через резисторы $R_1$ и $R_2$, и падением напряжения в диоде $Д_1$ от токов, протекающих через резисторы $R_3$ и $R_4$. Равнопотенциальность между входными зажимами *1* и *2* сохраняется в широком интервале температур благодаря примерно одинаковым температурным зависимостям падения напряжения в цепи эмиттер – база триода $T_1$ и диода $Д_1$. Если на вход схемы подается сигнал рассогласования, равный току срабатывания $I_{ср}$ и обращенный положительной полярностью к зажиму *1*, то триод $T_1$ закрывается, а триод $T_2$ открывается.

Для получения релейной характеристики нуль-индикатора предназначен резистор $R_4$, который образует цепочку параллельной положительной обратной связи. При изменении входного сигнала до величины тока возврата $I_в$ схема скачкообразно переходит в первоначальное состояние. При возврате разряд электромагнитной энергии обмотки реле Р переходит на резисторы $R_3$ и $R_4$. Резистором $R_1$ можно в широких пределах регулировать величину срабатывания нуль-индикатора, начиная с 5 мкА (50 мВ) и выше. Нуль-индикатор с тремя устойчивыми состояниями представляет собой соединение двух нуль-индикаторов, изображенных на рис. 9.2, *а*.

Если входного сигнала нет, то триоды $T_1$ и $T_3$ открыты, а триоды $T_2$ и $T_4$ закрыты, что соответствует обесточенному состоянию обмоток реле $P_1$ и $P_2$. Если отрицательная полярность сигнала будет подана к зажиму *2*, а к зажиму *1* – положительная, то триод $T_3$ останется открытым, а триод $T_1$ закроется. Благодаря этому открывается триод $T_2$ и срабатывает реле $P_1$. При обратной полярности входного сигнала срабатывает реле $P_2$. Характеристика нуль-индикатора с тремя устойчивыми состояниями показана на рис. 9.2, *б*.




*а* *б*

Рис. 9.2. Схема нуль-индикатора с тремя устойчивыми состояниями (*а*) и его характеристика (*б*)

## 9.2. Гидравлические и пневматические усилители

*Гидравлическим или пневматическим усилителем* называют устройство, перемещающее управляющее звено гидравлического или пневматического исполнительного механизма и одновременно усиливающее входной сигнал. Принципиальные схемы гидравлических и пневматических усилителей мало отличаются друг от друга (рис. 9.3, рис. 9.4).

В гидравлических усилителях управление движением исполнительного органа осуществляется распределением потоков жидкости, поступающей от специального насоса, а в пневматических – распределением потоков воздуха, поступающего от специальных компрессоров.

Характеристики гидравлических и пневматических усилителей несколько отличаются друг от друга, поскольку в гидравлических усили-

телях рабочая жидкость практически не сжимается, а в пневматических влияние сжатия воздуха особенно заметно при больших мощностях выходного сигнала и высоких ускорениях. Лишь для медленно меняющихся сигналов и малой мощности усиления статические характеристики пневматических и гидравлических усилителей аналогичны.

В сельскохозяйственной технике чаще используются гидравлические усилители. Они применяются в автоматических устройствах мобильных машин, в частности для управления навесными агрегатами, и в системах автоматического вождения тракторов и комбайнов.

Гидроусилители полевых агрегатов питаются от гидросистем трактора или от специального масляного насоса шестеренчатого типа. Гидроусилители состоят из двух основных блоков: управляющего и исполнительного. Блоки между собой связаны маслопроводами. Для поддержания в системе необходимого давления рабочей жидкости используются перепускные клапаны. В качестве управляющих органов применяются золотники, струйные трубки и устройства типа сопло-заслонка.

На рис. 9.3 показана схема включения гидроусилителя с золотниковым управляющим органом *1* и возвратно-поступательным движением штока *7* исполнительного гидроцилиндра *2*. Давление рабочей жидкости, забираемой из бака *3*, создается двигателем *4* с насосом *5* и регулируется редукционным клапаном *6*.

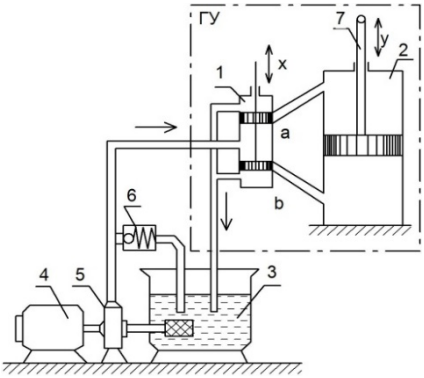



Рис. 9.3. Схема гидроусилителя с золотниковым управляющим органом

При нейтральном положении буртики золотника перекрывают окна a и b, вследствие чего шток *7* гидроцилиндра находится в строго опре-

деленном положении. Под действием входного сигнала *x* буртики золотника отходят от нейтрального положения и открывают окна *a* и *b* в гильзе золотника. Рабочая жидкость под давлением устремляется в одну из полостей гидроцилиндра *2* и вызывает перемещение его поршня на величину *y*.

Из второй полости гидроцилиндра масло сливается в бак. Проходное сечение окон *a* и *b* в гильзе зависит от входной величины x и определяет величину дросселирования потока рабочей жидкости. По этой причине гидроусилители с золотником называют дроссельными усилителями.

Схема гидроусилителя со струйной трубкой показана на рис. 9.4. В корпусе *1* усилителя расположена струйная трубка *2* с конической насадкой. Начальное положение струйной трубки изменяют регулировочным винтом *7* с пружиной. Струйная трубка может поворачиваться вокруг оси О на небольшой угол вверх или вниз под действием толкателя *3*, который соединяется с датчиком. Против насадки расположены два приемных расширяющихся сопла с окнами *a* и *b*, которые соединены трубопроводами *6* с полостями исполнительного механизма *5*. В струйную трубку подается от насоса рабочая жидкость под давлением. В конической насадке трубки происходит увеличение скорости потока жидкости и, следовательно, увеличение запаса кинетической энергии.

При нейтральном положении трубки струя жидкости под действием давления распределяется в оба входных окна *a* и *b*, а исполнительный механизм остается в первоначальном устойчивом положении.

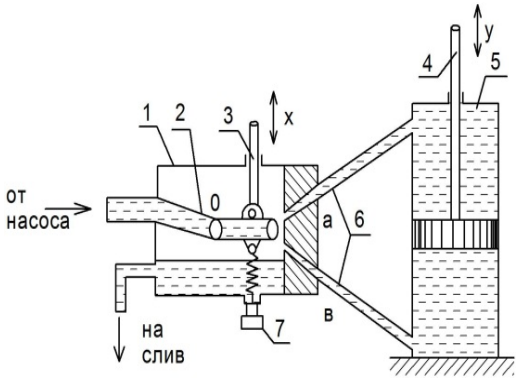



Рис. 9.4. Схема гидроусилителя со струйной трубкой

При отклонении струйной трубки от нейтрального положения в одном приемном сопле давление возрастает, а во втором падает. Под действием разности давлений происходит перемещение штока *4* исполнительного механизма на величину *y*. К корпусу усилителя присоединяется маслопровод, через который масло сливается в бак.

Принципиальная схема гидроусилителя с управляющим органом типа сопло-заслонка показана на рис. 9.5. Гидроусилитель состоит из корпуса *1*, дросселя *2* с постоянным проходным сечением, сопла *3* и заслонки *4*. Сопло и заслонка образуют дроссельное устройство с переменным проходным сечением. Величина зазора между торцом и заслонкой зависит от входной величины x, получаемой от датчиков. При изменении положения заслонки изменяется расход рабочей жидкости через сопло, вследствие чего изменяется давление этой жидкости $P_2$, воздействующее на перемещение исполнительного органа ИО.

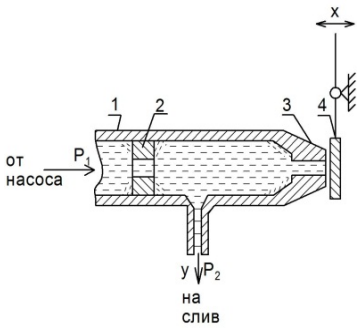



Рис. 9.5. Схема гидроусилителя с управляющим органом типа сопло-заслонка

Динамическая характеристика гидроусилителя $y = f(t)$ зависит не только от параметров гидросистемы, но и от положения золотника *x*. Поэтому каждому положению x соответствует множество значений *y* в пределах возможного хода поршня гидроцилиндра от $y_{мин}$ до $y_{макс}$. Гидроусилители изготовляются без обратной связи и с жесткой обратной связью по положению поршня гидравлического исполнительного механизма. Динамическая характеристика гидроусилителя с жесткой обратной связью изображена на рис. 9.6. Для небольших выходных мощностей и перемещений гидравлические и, особенно, пневматические усилители изготовляются мембранного типа.

Рассмотренные схемы гидроусилителей называются однокаскад-

ными. Для получения большой мощности на выходе гидроусилителя при высокой чувствительности и малом усилии со стороны управляющего органа применяют усилители с несколькими каскадами (ступенями) усиления. Принцип работы многокаскадных усилителей заключается в том, что исполнительный орган первого усилителя воздействует на управляющий орган последующего усилителя, имеющего значительный расход и высокое давление рабочей жидкости и т. д.

Гидроусилители от других типов усилителей отличаются большой выходной мощностью и значительным коэффициентом усиления по мощности. Расход жидкости в системе управления незначителен и составляет в среднем 3–5 % от наибольшего расхода в исполнительном блоке.

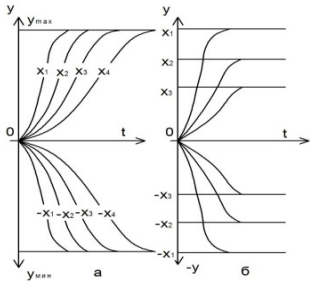



Рис. 9.6. Динамические характеристикигидроусилителя:
*а* – без обратной связи; *б* – с обратной связью

## 9.3. Электромагнитные командные устройства автоматики

### 9.3.1. Электромагнитные реле и электромагниты

Электромагнитные реле (ЭМР) представляют собой электромеханические контактные устройства, преобразующие управляющий электрический ток в магнитное поле, которое оказывает силовое скачкообразное воздействие на подвижное намагниченное тело, механически связанное с электрическим контактом реле или являющееся подвижной частью этого контакта. При возникновении управляющего тока в ЭМР происходит скачкообразное срабатывание контакта, который из разомкнутого (замкнутого) состояния через замыкание (размыкание) переходит в замкнутое (разомкнутое) состояние.

В разомкнутом состоянии контакт имеет видимый разрыв с высокой электрической прочностью и контактным сопротивлением на уровне поверхностного сопротивления элементов конструкции реле. В замкнутом состоянии переходное сопротивление механического контакта, выполненного из соответствующих материалов, составляет единицы – десятки мОм, а падение напряжения на контакте даже при протекании тока силой в десятки ампер не превышает 100...200 мВ. Схема простейшего электромагнитного реле показана на рис. 9.7. Подвижный якорь *1* притягивается к неподвижному сердечнику *2* электромагнита, по обмотке *3* которого протекает ток. Перемещение якоря приводит к замыканию контактов *5*. При отсутствии тока якорь и контакты возвращаются в исходное положение противодействующей пружиной *4*. Чтобы под влиянием остаточного магнитного потока якорь не оставался притянутым к сердечнику, на нем укреплен небольшой штифт *6*, высотой 0,1–0,2 мм, называемый штифтом отлипания. Якорь и сердечник реле изготовляются из магнитомягкого материала, а штифт – из немагнитного материала (латуни или меди).

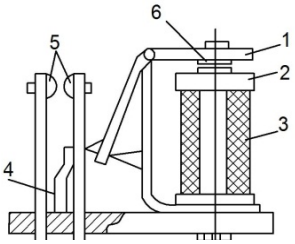


Рис. 9.7. Электромагнитное реле

По роду тока в обмотке различают электромагнитные реле постоянного и переменного тока промышленной и высокой частоты. В свою очередь реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные.

Нейтральные реле не различают полярности сигнала и одинаково реагируют на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке. В поляризованных реле в зависимости от полярности сигнала изменяется направление действующего на якорь усилия и при срабатывании замыкаются только те контакты, которые соответствуют полярности данного сигнала.

По своему назначению реле подразделяются на основные, реагирующие на изменение основных электрических величин, и вспомогательные. К вспомогательным можно отнести промежуточные реле, предназначенные для размножения числа контактов и передачи сигнала от одних реле к другим реле или аппаратам с одновременным повышением коммутационной способности управляемых цепей; реле выдержки времени, осуществляющие функции управления по временному фактору, и сигнальные реле, фиксирующие действия основных

реле и управляющие световыми и звуковыми сигналами.

Правильная и надежная работа электромагнитных реле во многом зависит от надлежащего согласования тяговых и механических характеристик.

Под *тяговой характеристикой* понимают зависимость электромагнитного усилия от воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита реле. Зависимость усилия противодействующей пружины от перемещения якоря в реле называют *противодействующей,* или *механической, характеристикой*.

Для того чтобы реле сработало, тяговая характеристика должна лежать выше механической, а чтобы реле отпустило – ниже ее.

Тяговые характеристики $F_э = f(\delta)$ представляют собой семейство гипербол для различных ампервитков в пределах изменения зазора от $\delta_{мин}$ до $\delta_{макс}$, механическая $F_м = f(\delta)$ – ломаную линию. Если якорь притянут ($\delta_{мин}$) то, очевидно, увеличение электромагнитного усилия не вызовет дополнительного его перемещения (отрезок 1–2). Отпускание реле происходит при $F_м = F_{э.\ отп}$ в точке *2*, после чего с ростом δ противодействующая сила пружины реле постепенно уменьшается (отрезок 2–3), а затем резко падает до конечного значения (отрезок 3–4). При увеличении тока в обмотке якорь реле трогается в точке *4*, но притягивается к сердечнику только в точке *3* при $F_{э.\ ср}$ (рис. 9.8).

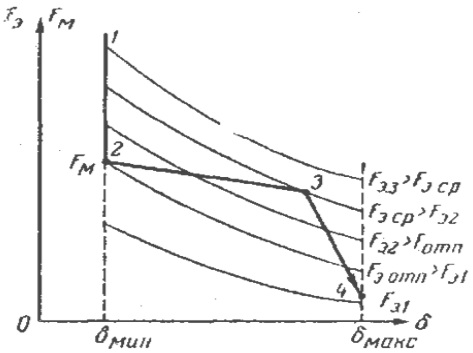



Рис. 9.8. Тяговые $F_э$ и механическая $F_м$ характеристики электромагнитного реле

Особенность реле переменного тока состоит в том, что в них применяются специальные меры для устранения вибрации контактов, а сердечник электромагнита набирается из листовой трансформаторной стали с целью уменьшения потерь на вихревые токи.

Вибрация контактов вызывается периодическим изменением величины и направления переменного синусоидального тока. При синусоидальном токе тяговое усилие реле меняется с двойной частотой от нуля до максимума в течение каждого полупериода. Следовательно, и якорь реле будет отходить и притягиваться также с двойной частотой, что ухудшает работу контактов и вызывает специфическое гудение реле.

Для устранения вибраций на часть полюса электромагнита насаживают медный короткозамкнутый виток, называемый экраном (рис. 9.9, *а*), который вызывает расщепление общего магнитного потока Ф реле на два потока $Ф_А$ и $Ф_Б$, сдвинутых между собой на некоторый угол φ тягового усилия реле переменного тока без короткозамкнутого витка и с короткозамкнутым витком.

Магнитный поток $Ф_1$ наводит в короткозамкнутой обмотке ток $I_к$, сдвинутый на угол 90° по отношению к потоку Ф (при неучете потерь в стали). Ток $I_к$ создает магнитный поток $Ф_к$, который в части А полюса геометрически складывается с потоком $Ф_1$: $Ф_А = Ф_1 + Ф_к$, а в части Б вычитается из потока $Ф_2$: $Ф_Б = Ф_2 – Ф_к$.

Таким образом, потоки $Ф_А$ и $Ф_Б$ сдвинуты на угол φ. Каждый из них создает тяговое усилие, а результирующее усилие $F_э$ имеет тем меньше пульсаций, чем ближе к 90° угол φ (рис. 9.9, в, *г*).

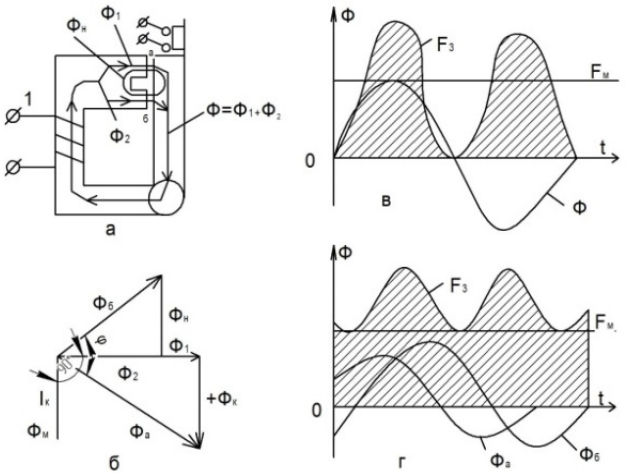



Рис. 9.9. Электромагнитное реле переменного тока скороткозамкнутым витком: *а* – конструкция реле; *б* – векторная диаграмма; *в, г* – графики изменения

У поляризованных реле поток, создаваемый постоянным магнитом *1*, на пути от южного полюса *S* разветвляется на два равных потока и по магнитопроводящим винтам *6* проходит через часть сердечника электромагнита *7* (рис. 9.10, *а*). Далее через воздушные зазоры обе части потока $Ф_0$ проходят с противоположных сторон в якорь *2*. Из якоря по магнитопроводящему лепестку *4* поток возвращается к северному полюсу магнита N.

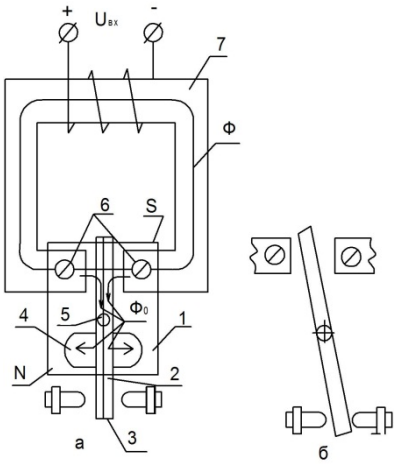



Рис. 9.10. Поляризованное реле: *а* – схема распределения магнитных потоков; *б* – контакты двухпозиционного реле с преобладанием к правому контакту

Направление магнитного потока Ф в электромагните зависит от полярности тока в обмотке. Следовательно, в одном из полюсов электромагнита *7* результирующий поток равен сумме потоков Ф и $Ф_0$, а в другом – их разности. Для реле, изображенного на рис. 9.10, *а*, магнитный поток (в веберах, Вб) находится по зависимости:

$$Ф_л = Ф – Ф_0 \text{ и } Ф_п = Ф + Ф_0. \qquad (9.1)$$

Естественно, что якорь реле, поворачиваясь вокруг оси *5*, притягивается к тому полюсу электромагнита *7*, в котором поток больше (в нашем случае – правый), и замыкает концом *3* левый контакт реле. При изменении направления тока в обмотке якорь перебрасывается в другую сторону. Повышенная чувствительность и быстродействие

поляризованного реле объясняются малым воздушным зазором *6* и усиливающим действием магнитного потока $\Phi_0$. Из выражения видно, что чем больше поток $\Phi_0$, тем меньшей величины может быть поток Ф и, следовательно, тем выше чувствительность реле.

В двухпозиционных реле замыкается один из двух неподвижных контактов в зависимости от полярности входного сигнала постоянного тока и остается замкнутым после снятия сигнала. Если неподвижные контакты отрегулировать так, как показано на рис. 9.10, *б*, то получится двухпозиционное реле с преобладанием к правому контакту. При отсутствии сигнала всегда будет замкнут правый контакт. Это объясняется тем, что левый воздушный зазор между магнитопроводом и якорем всегда меньше, чем правый. В трехпозиционном реле имеется возвратная пружина, возвращающая якорь в среднее положение после снятия сигнала.

Реле выдержки времени предназначены для создания определенной временной задержки при передаче сигнала от одного элемента автоматики к другому.

Программное устройство представляет собой разновидность реле выдержки времени и имеет обычно несколько независимых выдержек времени сравнительно большой величины.

Реле выдержки времени изготовляются с электрическими, пневматическими и гидравлическими воспринимающими органами и с электрическими, механическими, пневматическими, гидравлическими и другими устройствами замедления. Наибольшее распространение получили реле с электрическими воспринимающими органами, реагирующие на сигналы постоянного или переменного тока.

Для создания сравнительно небольшой выдержки времени (до 5 с) часто применяются простейшие схемные методы, замедляющие нарастание или спадание токов в обмотке электромагнитного реле постоянного тока при помощи резисторов, конденсаторов, полупроводниковых диодов, дросселей и короткозамкнутых витков или колец.

При большом числе витков обмотки реле весьма эффективным методом является шунтирование обмотки активным сопротивлением или диодом. Сущность такого метода состоит в том, что *э.д.с.* самоиндукции, возникающая в обмотке реле после его отключения ключом К, поддерживает протекание тока в прежнем направлении. Этот ток, замыкаясь через шунтирующее сопротивление *R*, медленно убывает, а якорь реле некоторое время остается в притянутом состоянии.

Выдержка времени на отпускание реле может быть определена по формуле:

$$t = \frac{L}{R_р + R} \ln \frac{U_{вх}}{I_{тр} R_р},$$

где $R_р$ и $L$ – соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки реле в положении покоя, т. е. при максимальном рабочем зазоре;

$I_{тр}$ – ток трогания якоря реле при срабатывании.

Следует заметить, что шунтирующее сопротивление вызывает дополнительный расход мощности. Этот недостаток устранен при использовании шунтирующего диода *Д*, включенного навстречу питающему напряжению. Кроме того данный способ позволяет получить большую выдержку времени, поскольку диод включен в проводящем направлении и в уравнении сопротивление $R = 0$.

Продолжительность времени задержки срабатывания зависит от постоянной времени цепи и может изменяться в широких пределах подбором соответствующей емкости конденсатора *C* и сопротивления *R*.

### 9.3.2. Электромагнитное реле герконового типа

Существуют также реманентные материалы на основе ферритов, ремендюров и других сплавов, имеющие достаточно большую коэрцитивность ($H_c$ = 20…100 А/см). Эти материалы обладают широкой петлей гистерезиса, имеют значительное магнитное сопротивление и требуют больших затрат энергии на намагничивание и перемагничивание), что позволяет использовать их в качестве постоянных магнитов, намагничиваемых и перемагничиваемых при помощи маломощных электрообмоток.

Устройство реле с магнитоуправляемым контактом описывается всего одним динамическим СЭ, состоящим из электромагнитного механизма, подвижным телом которого является подвижный элемент контакта. Ферромагнитные контактные элементы намагничиваются искусственным магнитным полем, создаваемым управляющим током, в результате чего близко расположенные нормально разомкнутые контактные элементы притягиваются, преодолевая упругие силы противодействия.

Прототипом первого ЭМР с магнитоуправляемым контактом (МУК), показанного на рис. 9.11, является реле В. И. Коваленкова, предложенное в 1925 г. с целью упрощения конструкции и повышения

быстродействия классического якорного реле. В исходном состоянии (управляющий ток в обмотке отсутствует) перекрывающиеся концы ПКЭ разомкнуты и отстоят друг от друга на расстоянии воздушного зазора.

При подаче сигнала управления в обмотку *О* в магнитной системе протекает магнитный поток, замыкающийся через рабочий зазор и создающий в нем электромагнитную силу $F_Э$, замыкающую *ПКЭ*. Достигнутое максимальное значения $F_Э$ сохраняется до тех пор, пока действует коэрцитивная сила $H_c$.

После прекращения тока в обмотке поведение *ПКЭ*, как и якоря у классических *ЭМР*, во многом зависит от магнитных свойств магнитопровода.

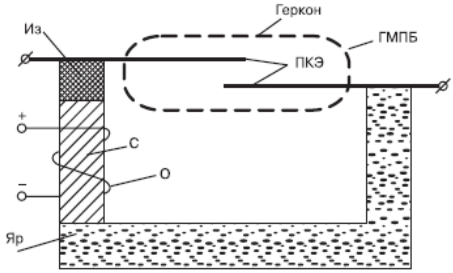



Рис. 9.11. Схема ЭМР с МУК и замкнутой магнитной цепью: *О* – обмотка; *С* – сердечник; *Яр* – ярмо; *Из* – изолятор; *ПКЭ* – подвижный контактный элемент; *ГМПБ* – герметичный магнитопроницаемый баллон

Дальнейшим шагом по совершенствованию *ЭМР* с *МУК* было заключение рабочей части контакта (выделено пунктиром на рис. 9.11) в герметичный магнитопроницаемый баллон. Такой контакт называют герметизированным контактом или герконом, а *ЭМР* на их основе – герконовым реле. Для повышения чувствительности и уменьшения габаритов реле геркон помещают вблизи или внутри обмотки *ЭМ*, получая, таким образом, разомкнутую магнитную цепь со стороны выводов *ПКЭ* (рис. 9.12).

Простейшим герконом и *ЭМР* на его основе является нормально разомкнутый или замыкающийся контакт, срабатывающий при любой поляризации постоянного тока. Простейший размыкающийся контакт образуется, если параллельно нормально разомкнутому контакту установлен постоянный магнит, поляризующее поле которого постоянно

держит контакт в замкнутом состоянии. Такой контакт разомкнется только после подачи в обмотку реле тока определенной полярности.

Помимо обычных «сухих» контактов, геркон может содержать контакты, смоченные жидким металлом, например, ртутью, что позволяет повысить скорость размыкания жидкометаллических герконов.

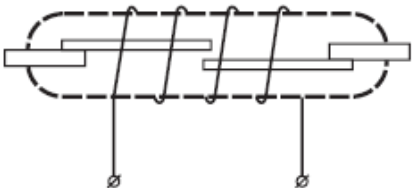


Рис. 9.12. Схема герконового ЭМР с разомкнутой магнитной цепью

### 9.3.3. Программируемые логические контроллеры

В командной системе автоматического управления управление осуществляется с помощью командоаппаратов, в последнее время это программируемые микроконтроллеры (программируемые командоаппараты).

В связи с развитием микроэлектронной техники в последние годы получают распространение программируемые схемы электроавтоматики (устройства с программной логикой). Релейно-контактные схемы электроавтоматических устройств станков и других технологических объектов интенсивно вытесняются микроэлектронными управляющими устройствами, построенными на интегральных схемах, на выходах которых имеются силовые ключи, непосредственно управляющие исполнительными органами.

В настоящее время широкое распространение на производстве получают промышленные контроллеры и ПЛК (программируемые логические контроллеры, предназначенные для применения в системах автоматизации там, где использование других средств автоматики не удовлетворяет современным требованиям.

Ввиду большого многообразия решаемых задач все программируемые микроконтроллеры по способу организации алгоритма работы, по гибкости программы можно разделить на три класса:

– микропрограммные управляющие устройства с жесткой логикой (матричные), т. е. программируемые микроконтроллеры, которые по-

строены по принципу жесткого программного автомата;

– программируемые командоаппараты (ПК), т. е. командоаппараты, где программа строится на базе репрограммируемого (перепрограммируемого) запоминающего устройства (РПЗУ, ППЗУ) или оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), программа алгоритма действия может записываться в процессе проблемной ориентации на конкретный объект в производственных условиях с занесением программы с пульта программирования;

– программируемые командоаппараты, построенные на базе управляющих ЭВМ.

Фирма Siemens была пионером в области разработки промышленных контроллеров и ПЛК, начав их массовое производство в 1996 году. Логический модуль LOGO! изначально задумывался как промежуточное звено между традиционными релейными элементами автоматики (контакторы, реле времени и т. п.) и программируемыми контроллерами. В нем вместо соединения проводов должно было использоваться логическое соединение функций, обычно реализуемых аппаратно с помощью отдельных устройств. Но в отличие от программируемых контроллеров сложность устройств должна была позволять работать с ними персоналу без специальных знаний в области программирования. С этой же целью ввод программы в LOGO! осуществляется непосредственно со встроенных индикатора и клавиатуры. Для подключения к источникам сигналов и исполнительным устройствам модули LOGO! первых поколений имели 6 или 12 дискретных входов и 4 или 8 дискретных выходов (варианты Basic и Long соответственно). Затем к дискретным входам добавилось два аналоговых.

В модульном варианте ПЛК LOGO! (рис. 9.13) можно реализовать максимум с 24 дискретными и 8 аналоговыми входами, а также 16 дискретными выходами. Напряжение питания входных цепей в LOGO! соответствует напряжению питания модуля, которое может быть 12/24.

Рис. 9.13. Модульное исполнение ПЛК фирмы Siemens

В постоянного тока, 24 и 230 В переменного тока. Выходы могут быть транзисторными или релейными. Нагрузочная способность последних (до 10 А) обеспечивает непосредственное подключение достаточно мощных исполнительных устройств.

Новые модули расширения делают LOGO! способным быстро реагировать на изменения и занимают в два раза меньше места, чем сам LOGO! Кроме того, к такому микроконтроллеру можно подключить коммуникационные модули для работы в сетях AS-interface, EIB Instabus или LON. Существуют и логические модули без дисплея и клавиатуры, благодаря чему они почти на 20 процентов дешевле.

Главной особенностью ПЛК является то, что схема релейной автоматики собирается из программно реализованных функциональных блоков. В распоряжении пользователя имеется восемь логических функций типа, большое число типов реле, в том числе, реле с задержкой включения и выключения, импульсное реле, реле с самоблокировкой, выключатель с часовым механизмом, тактовый генератор, календарь, часы реального времени с возможностью автоматического перехода на летнее/зимнее время и др.

Программирование модулей ПЛК может выполняться с помощью встроенных клавиатуры и дисплея. Оно сводится к выбору необходимых функциональных блоков, соединению их между собой и заданию параметров настройки блоков (задержек включения/выключения, значений счётчиков и т. д.). Для хранения управляющей программы в модуле имеется встроенное энергонезависимое запоминающее устройство.

Однако ввод программы с панели управления может быть оправдан только для небольших по объему программ или в случае острой необходимости внесения корректив в уже работающую программу непосредственно на объекте. Для относительно сложных схем очевидна необходимость использования программного пакета. Этот пакет позволяет разрабатывать в графической форме и документировать программы для ПЛК на компьютере и отлаживать их в режиме эмуляции логического модуля. Принцип работы аналогичен используемому при ручном вводе, но эффективность во много раз выше. Выбранные функциональные блоки мышью перетаскиваются на рабочее поле, затем соединяются и параметрируются. Для каждого функционального блока может быть написан комментарий, который существенно облегчит понимание принципа работы программы другому пользователю или поможет самому разработчику через некоторое время вспомнить собственные замыслы. Если по результатам эмулирования корректи-

ровка программы не требуется, то ее можно загрузить в память ПЛК с помощью специального кабеля, подключаемого к тому же интерфейсному гнезду, что и модули памяти.

Важной особенностью современных программаторов является развитое программное обеспечение, которое, по существу, управляет работой оператора при вводе, причем на экране дается подробное описание каждой команды, а также может даваться полное руководство (инструкция) по использованию программатора. Сообщения оператору выдаются в символах, удобных для восприятия.

# 10. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## 10.1. Классификация исполнительных механизмов

Исполнительные механизмы автоматических устройств предназначены для силового воздействия на регулирующие органы объектов управления. Они классифицируются по виду используемой энергии: электрические, гидравлические и пневматические. В мелиорации обычно применяют электрические и гидравлические механизмы. По характеру воздействия на регулирующий орган различают двухпозиционный, многопозиционные и пропорциональные исполнительные механизмы.

Исполнительные устройства (механизмы) или сервомоторы, получают сигнал от усилителя и формируют перестановочное усилие для привода в действие регулирующего органа. Базовый принцип классификации сервомотора – вид энергоносителя, в зависимости от которого они подразделяются на гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные.

По характеру перемещения рабочего органа бывают сервомоторы непрерывного и дискретного действия (открыто – закрыто), а также поступательного и вращательного движения. Основные характеристики сервомоторов – коэффициент усиления по мощности, скорость (постоянная или переменная) и усилие (перемещение) на выходе. Конструктивно сервомотор часто представляет единый узел вместе с усилителем, в особенности в гидравлических и пневматических устройствах.

Требования к исполнительным устройствам: линейное (угловое) перемещение согласуется с перемещением регулирующего органа; статическая характеристика должна быть по возможности линейной; сервомотор – реверсивный, с рабочими органами минимальной массы;

мощность должна обеспечивать заданную скорость перемещения на любых режимах.

## 10.2. Электрические исполнительные механизмы (сервомоторы)

Эти исполнительные механизмы должны обеспечивать перемещение регулирующего органа по командам, поступающим от электрического регулятора при автоматическом управлении.

Среди электрических сервомоторов, получивших наибольшее распространение в автоматике, следует назвать электродвигатели и электромагниты.

Электрические исполнительные механизмы выполняются с электромагнитным (соленоидным) и электродвигательным приводом.

Исполнительные механизмы с электромагнитным приводом обеспечивают поступательное перемещение регулирующих органов. Они применяются главным образом в электромагнитных клапанах и вентилях для двухпозиционного регулирования. Для того, чтобы открыть клапан и вентиль, питание подают на катушку электромагниту, которая втягивает сердечник, связанный с запорным органом вентиля. Закрытие вентиля происходит под действием пружины при отключении катушки электромагнита.

Для снижения потребления электроэнергии эти механизмы оснащаются механическими защелками, удерживающими сердечник при открытом вентиле и отключении питания катушки. Закрытие происходит за счет подачи импульса тока в маломощную катушку электромагнита освобождения защелки.

Чаще всего используется прямоходовой электромагнит с втягивающимся якорем или соленоид (рис. 10.1, *а*), хотя возможны и конструкции с притягивающимся (рис. 10.1, *б*) и поворотным (рис. 10.1, *в*) якорем. Электромагнитные сервомоторы работают в позиционном (релейном) режиме – открыто – закрыто, но существуют и многокомпозиционные исполнительные устройства.

В электродвигательных исполнительных механизмах для привода используются одно- и двухфазные двигатели переменного тока, асинхронные трехфазные, синхронные, двигатели постоянного тока и сельсины.

По устройству и принципу действия электрические двигатели классифицируют на асинхронные, синхронные и коллекторные. Асинхронные и синхронные – двигатели переменного тока; коллекторные - могут работать на переменном или постоянном; а универсальные –

на переменном и постоянном токе. Асинхронные двигатели применяют для приводов с регулируемой и постоянной частотой вращения, синхронные – для приводов с постоянной частотой вращения. Двигатели постоянного тока широко используются для приводов с регулируемой частотой, коллекторные переменного тока – в системах, где требуется частота вращения, превышающая 3000 мин$^{-1}$, при промышленной частоте тока 50 Гц.

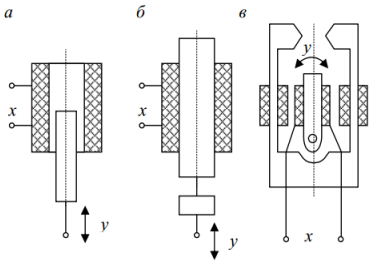



Рис. 10.1. Прямоходовой электромагнит: *а* – с втягивающимся якорем; *б* – с притягивающимся якорем; *в* – с поворотным якорем

В качестве сервопривода применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (в виде беличьей клетки). Специфика использования электродвигателей в качестве сервомоторов определяет и характер предъявляемых к ним требований в отношении реверсивности, изменения частоты вращения и устойчивости в широком диапазоне, линейности статической характеристики, большого пускового момента при снятии сигнала управления, быстродействия, малых габаритов и массы.

В зависимости от сочетания электродвигателя и регулирующего органа различают две основные структурные схемы электрических сервомоторов (рис. 10.2).

Различие в них определяется степенью несоответствия быстроходности и вращательного движения сервомотора тихоходности и поступательному, реже вращательному движению затвора регулирующего органа. Поэтому в конструкциях появляются дополнительные узлы: передачи (редукторы, муфты) различных типов, конечные выключатели для останова сервомотора по достижении затвором крайних или заданных положений (элементы обратной связи). При неуправляемом или плохо управляемом двигателе управляющее воздействие у при-

кладывается к передаче, что показано на схеме, изображенной на рис. 10.2, *а*. Схема на рис. 10.2, *б* предполагает наличие управляемого двигателя.

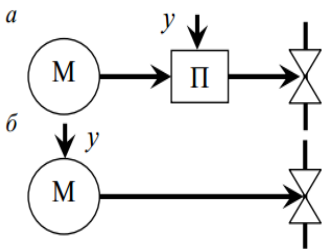



Рис. 10.2. Структурные схемы электрических сервомоторов:
*а* – неуправляемый двигатель; *б* – управляемый двигатель

Долгое время большинство электродвигателей выпускались быстроходными, что создавало определенные трудности при сочленении с регулирующими органами. Появление моторов с малой скоростью вращения, например серии МЭО, которые совершают один оборот за 40, 100, 250 и 630 с, позволило значительно усовершенствовать технику автоматизации.

Разработана серия унифицированных исполнительных механизмов блочно-модульной конструкции.

На рис. 10.3 приведена схема двухпозиционного исполнительного механизма с электродвигательным приводом типа ДР-1М, который состоит из конденсаторного двигателя I и контактного управляющего устройства II. Двигатель имеет две статорные обмотки *3* и *4*. В одну из них включен конденсатор для смещения фазы протекаемого тока и получения вращающегося магнитного поля. С валом ротора *2* кинематически связан ползунок *5* контактного управляющего устройства. В исходном положении ползунок находится на одном из контактов *8* или *9*, выступающих над контактной пластиной *6*. Когда ползунок размещен на контакте *8* и замыкается вверх контакт датчика *1*, управляющего исполнительным механизмом, получают питание обмотки двигателя и он начинает вращаться. Ползунок сходит с контакта *8* на пластину *6*, но цепь питания двигателя остается замкнутой за счет перемыкания ползунком пластин *6* и *7*.

Сделав пол-оборота, ползунок окажется на контакте *9* и двигатель

остановится. При переключении контакта датчика *1* вниз двигатель вновь получает питание и, вращаясь, переместит ползунок на полоборота до размещения на контакте *8*. Двигатель всегда вращается в одном направлении, а направление движения регулирующего органа изменяется за счет внешних кинематических связей между исполнительным механизмом и регулирующим органом.

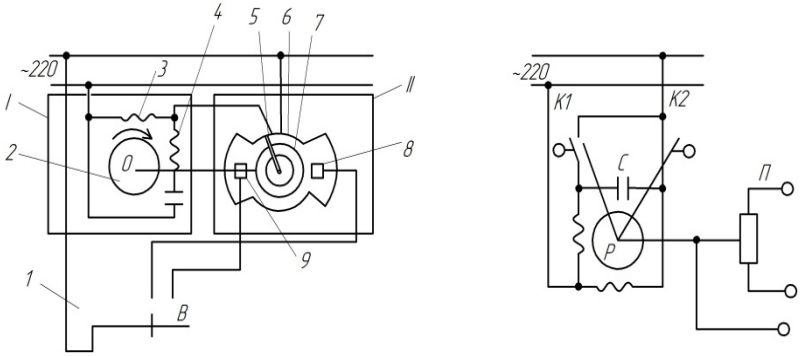



Рис. 10.3. Исполнительные механизмы с электродвигательным приводом: *а* – типа ДР-1М; *б* – типа ПР; I – конденсаторный двигатель; II – контактное управляющее устройство; *1* – контактный датчик; *2* – ротор двигателя; *3, 4* – статорные обмотки двигателя; *5* – ползунок контактного управляющего устройства; *6, 7* – контактные пластины; *8, 9* – контакты; С – конденсатор; К1, К2 – конечные выключатели; П – резистивный датчик положения; В – выключатель

Механизм ДР-М отличается от механизма ДР-1М возможностью сочленения с регулирующим органом не только с помощью диска, совершающего вращательное движение, но и штоком, перемещающимся поступательно.

В системах пропорционального регулирования применяют исполнительные механизмы ПР-1М, ПР-М и МЭО. Для привода используются конденсаторные двигатели, но в отличие от механизмов *ДР* предусмотрена возможность реверсирования. Реверсирование происходит за счет переключения конденсатора *С* из одной цепи обмотки двигателя в другую конечными выключателями *К1* и *К2*.

Для дистанционного контроля положения и устройства обратной связи механизмы оснащаются блоками с индуктивными, резистивными датчиками и микропереключателями положения.

В состав электрического исполнительного механизма (рис. 10.4)

обычно входят следующие основные элементы: реверсивный электродвигатель, ручной привод, концевые и путевые выключатели, тормозное устройство и датчик положения выходного вала. Электродвигатель *1* с редуктором *2* служат для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для перемещения регулирующего органа. Маховик *3* необходим для перемещения выходного вала *4* исполнительного механизма вручную при выходе из строя тиристорного пускателя или электродвигателя.

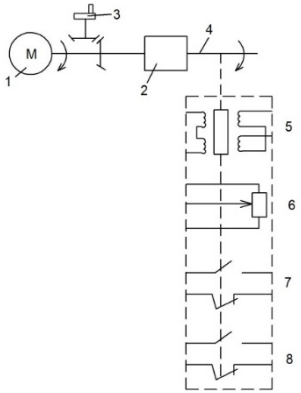



Рис. 10.4. Электрический исполнительный механизм

В исполнительном механизме имеются вспомогательные устройства, обеспечивающие преобразование угла поворота выходного вала *4* в электрические сигналы различного назначения. Дифференциально-трансформаторный преобразователь *5* служит для введения в регулятор сигнала обратной связи, пропорционального углу поворота выходного вала исполнительного механизма или, что то же самое, степени открытия регулирующего органа.

Выходной сигнал реостатного преобразователя *6* используется для работы дистанционного указателя положения исполнительного механизма, устанавливаемого на щите оператора рядом с кнопками ручного дистанционного управления. Концевые выключатели *7* выполняют защитные функции. Они отключают тиристорный пускатель при достижении регулирующим органом крайних положений. Путевые выключатели *8* служат для ограничения диапазона перемещения регули-

рующего органа. В автоматическом режиме работы они отключают пускатель при выходе за пределы установленного диапазона.

*Электрические исполнительные механизмы* должны обеспечивать перемещение регулирующего органа по командам, поступающим от электрического регулятора при автоматическом управлении или от оператора при ручном дистанционном управлении. При поступлении команды исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью. Однако благодаря импульсному режиму работы средняя скорость выходного вала исполнительного механизма оказывается переменной. Различные типы исполнительных механизмов отличаются величиной крутящего момента на выходном валу и скоростью его поворота при включенном электродвигателе.

Исполнительные механизмы *ПР*, *ДР* и *МЭО* широко используются для привода поворотных дисковых затворов. В качестве привода задвижек и затворов перегораживающих сооружений применяются многооборотные электрические исполнительные механизмы (табл. 10.1).

Таблица 10.1. **Технические характеристики двигателей исполнительных механизмов М,А, Б, В, Г, Д**

| Показатель | Тип механизма | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | М | А | Б | В | Г | Д |
| Мощность двигателя, кВт | 0,03 | 0,12<br>0,18 | 0,6<br>1,3 | 3,0<br>4,0 | 4,0<br>7,5 | 7,5<br>– |
| Частота вращения двигателя, об/мин | 1300 | 1400 | 1300 | 1350 | 1350 | 1300 |

В мелиоративной практике наиболее распространены унифицированные исполнительные механизмы типов М, А, Б, В, Г, Д. Они принципиально однотипны и отличаются по габаритам, мощности двигателя и несущественными конструктивными изменениями. Асинхронные трехфазные двигатели с повышенным скольжением и фланцевым креплением используют как приводные двигатели в механизмах. Двигатель связан с запорным органом задвижки червячным редуктором (в механизмах М и А – цилиндрическим). Механизм имеет стрелку местного указателя положения, кинематически связанную с приводным валом, и потенциометр дистанционного указателя. Защищается механизм от перегрузок муфтой ограничения крутящего момента или реле максимального тока.

Предусматриваются штурвал ручного привода и механическая бло-

кировка, которая при включении ручного привода отсоединяет вал двигателя от вала червячного редуктора, и, напротив, при сочленении двигателя с редуктором расщепляется его кинематическая связь со штурвалом ручного привода.

Электрические исполнительные механизмы также применяют для привода плоских щитовых затворов перегораживающих сооружений. Промышленностью серийно выпускаются винтовые подъемники типа В-73 с асинхронным трехфазным приводом. Двигатели соединяются через редуктор с грузовыми гайками привода грузовых подъемных винтов с трапецеидальной резьбой. Для местного отсчета и дистанционных измерений установлены датчики положения затвора. В подъемниках предусмотрена рукоятка ручного подъема.

Техническая характеристика приводных двигателей винтовых подъемников приведена в табл. 10.2.

Таблица 10.2. **Техническая характеристика приводных двигателей винтовых подъемников В-73**

| Показатель | Тип подъемника | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 ЭВ | 2,5 ЭВ | 5 ЭВД | 5 ЭВ | 10 ЭВД | 10 ЭВ | 20 ЭВД | 20 ЭВ |
| Мощность двигателя, кВт | 0,4 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 2,0 | 2,0 |
| Частота вращения двигателя, об/мин | 880 | 880 | 870 | 870 | 870 | 870 | 900 | 900 |
| Продолжительность подъема на 1 м двигателем, мин | 8 | 8 | 8 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 |
| Продолжительность подъема на 1 м вручную, мин | 3 | 7 | 9 | 15 | 19 | 20 | 40 | 33 |

## 10.3. Гидравлические и пневматические исполнительные механизмы

Из гидравлических исполнительных механизмов наиболее распространены поршневые и мембранные устройства.

Поршневой исполнительный механизм применяется, например, для дистанционного и автоматического регулирования положением крана-задатчика скорости дождевальной машины «Фрегат».

В качестве рабочей жидкости используется вода, поступающая непосредственно из трубопровода машины.

В мембранных исполнительных механизмах, используемых в мелиорации, рабочей средой является вода. Такие механизмы применяются для привода затворов, а также в гидравлических регуляторах.

На рис. 10.5 показана схема гидравлического регулятора уровня с мембранным исполнительным механизмом.

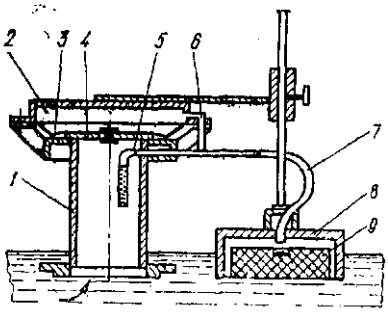



Рис. 10.5. Регулятор уровня с мембранным исполнительным механизмом:
*1* – выпускная труба; *2* – рабочая камера; *3* – мембрана; *4* – рабочий клапан;
*5* – дроссельная трубка; *6* – входная дроссельная трубка; *7* – гибкая трубка;
*8* – поплавковая камера; *9* – поплавок

Уровень воды регулируется за счет изменения подачи через впускную трубу *1*. Вода, поступающая снизу, выливается в резервуар через кольцевую щель между верхним концом трубы и рабочим клапаном *4*. Он соединен с гибкой мембраной *3*. Одновременно вода поступает в дроссельную трубку *5*. При низком уровне в резервуаре поплавок *9*, находящийся в поплавковой камере *8*, опускается вниз и открывает сливное отверстие гибкой трубки *7*. Вода из дроссельной трубки сливается в резервуар. В результате под давлением воды снизу он поднимается, увеличивая кольцевую щель, и поступление воды в резервуар возрастает.

При повышении уровня поплавок *9* перекрывает сливное отверстие трубки, и вода заполняет рабочую камеру *2*. За счет большой площади, на которую воздействует давление воды сверху, мембрана *3* прогибается вниз и рабочий клапан *4* прикрывает выход из трубы *1*. Как видно, в регуляторе конструктивно совмещены исполнительный механизм и регулирующий орган. Достоинством регулятора является отсутствие постороннего источника энергии, так как исполнительный механизм

работает за счет энергии регулируемого водяного потока.

Подавляющее большинство пневматических сервомоторов – мембранного типа одна - и двуполостные с возвратом от пружин или противовеса. Встречается и сильфонный привод, но для малых перестановочных усилий. В последнее время стали применяться поршневые исполнительные механизмы, однако проблемой остаются трение и уплотнения в пневмоцилиндрах. Устройство пневматического мембранного сервомотора показано на рис. 10.6. Сервомотор с мембраной *1*, штоком *2*, возвратной пружиной *3*, уплотнением сальниковым или лабиринтовым *4* изготовлен в комплекте с регулирующим органом – клапаном *5*, проходным (рис. 10.6, *а* и *б*) и трехходовым (рис. 10.6, *в*).

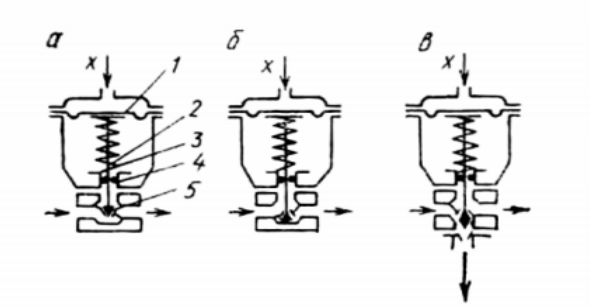



Рис. 10.6. Устройство пневматического мембранного сервомотора

# 11. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

## 11.1. Назначение и принципы автоматизации

Под теплоснабжением понимают обеспечение теплотой потребителей, осуществляемое системой теплоснабжения. Теплота передается с помощью теплоносителей, в качестве которых используют горячую воду или водяной пар. Системы, транспортирующие и распределяющие горячую воду, называются водяными. Если теплота передается с помощью водяного пара, система теплоснабжения называется паровой. Теплоносители с требуемыми параметрами (температурой и давлением) получают на источниках теплоты систем теплоснабжения, где теплота сгорания органического топлива трансформируется в энтальпию

теплоносителя. Для его нагрева на источниках теплоты могут использоваться: теплота, выделяемая при ядерных реакциях расщепления в реакторах на атомных станциях; тепло Земли *(геотермальная вода);* тепло Солнца; *вторичные энергетические ресурсы* промышленных предприятий. Однако преобладающая часть источников теплоты использует органическое топливо.

Под теплоснабжением жилых и общественных зданий понимаются подача и распределение теплоты с *целью отопления,* вентиляции и горячего водоснабжения, а под теплоснабжением промышленных потребителей – также подача и распределение пара (реже горячей воды) по теплоизолирующим установкам. Подача горячей воды и пара осуществляется с учетом режимов работы потребителей теплоты, что обеспечивается и контролируется автоматикой.

Под автоматизацией систем теплоснабжения понимается использование комплекса автоматических устройств для управления технологическими процессами в *системах теплоснабжения.* Автоматизация систем теплоснабжения включает регулирование (в частности, стабилизацию) параметров, управление работой оборудования и агрегатов (дистанционное, местное), защиту и блокировку их, контроль и измерение параметров, учет расхода отпускаемых и потребляемых ресурсов, телемеханизацию управления контроля и измерения. Комплекс средств автоматического регулирования отпуска теплоты в системе теплоснабжения предусматривает ступени: центрального регулирования в источнике плоты (теплоэлектроцентрали, котельной); группового регулирования в центральных тепловых пунктах, узлах распределения; местного общедомового (на все здание) регулирования или местного пофасадного (позонного) регулирования в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) при наличии пофасадного (позонного) разделения систем отопления здания; индивидуального регулирования у нагревательных приборов в помещениях здания. Регулирование отпуска теплоты в ступенях может осуществляться с применением следующих автоматических систем: регулирования температуры воды на отопление в зависимости от метеорологических параметров (температуры наружного воздуха) по заданному температурному графику (регулирование «по возмущению»); регулирования температуры воздуха в помещениях (регулирование «по отклонению»); комбинированного регулирования «по возмущению» и «по отклонению», которое может осуществляться как одной ступенью, так и сочетанием двух ступеней в разных звеньях системы теплоснабжения: одна – «по возмущению», другая – «по отклонению».

Выбор рационального комплекса ступеней регулирования отпуска теплоты производится в зависимости от структуры распределительных тепловых сетей, наличия пофасадного разделения системы отопления здания и средств индивидуального регулирования в помещениях. Указанные структуры сетей отличаются числом трубопроводов и размещением водонагревателей или смесительных устройств горячего водоснабжения. Технические решения по автоматизации регулирования отпуска теплоты в различных ступенях регулирования гидравлических режимов работы, управления оборудованием и защиты тепловых сетей и потребителей связаны с автоматизацией тепловых пунктов, насосных станций и защитой тепловых сетей.

Для ступени центрального регулирования рациональный режим отпуска теплоты выбирают с учетом типа теплоисточника, вида тепловой нагрузки и степени охвата тепловых пунктов (ТП) автоматизацией регулирования отпуска теплоты на отопление (сплошной, частичный). В целях экономии ресурсов в источниках теплоты широко применяют центральное регулирование по скорректированному графику температур, а в ТП выбирают такую схему присоединения водонагревателя горячего водоснабжения, чтобы обеспечить работу установок отопления и горячего водоснабжения по режиму связанного регулирования. В этом случае суммарная тепловая нагрузка ТП выравнивается за счет теплоаккумулирующей способности строительных конструкций отапливаемых зданий. При указанных режимах комплексная автоматизация систем теплоснабжения обеспечивает существенное снижение расчетного расхода сетевой воды в магистральных тепловых сетях и, следовательно, уменьшение диаметров трубопроводов сетей.

## 11.2. Автоматизация тепловых вводов

Выбор конкретной схемы автоматизации теплового ввода определяется принятой схемой присоединения его к тепловой сети. При зависимой схеме присоединение осуществляется через элеватор, через подмешивающие насосные установки или непосредственным присоединением к тепловой сети. При независимой схеме присоединение систем отопления осуществляется через пароводяные или водоводяные подогреватели. Системы отопления зданий, на тепловом вводе которых разность напоров достаточна для нормальной работы элеватора, присоединяют по элеваторной схеме. Присоединение систем отопления по схемам с насосным подмешиванием производится:

– при недостаточном для работы элеватора располагаемом напоре

на тепловом вводе (насос устанавливают между подающим и обратным трубопроводами);

– при необходимости увеличения располагаемого напора (насос устанавливают на подающем трубопроводе после подмешивающей перемычки);

– при давлении в обратном трубопроводе, превышающем допустимое (насос устанавливают на обратном трубопроводе от системы отопления).

При автоматизации тепловых вводов решаются следующие задачи: поддержание постоянного расхода и давления теплоносителя, регулирование температуры при присоединении системы отопления по независимой схеме и защита системы отопления от повышения давления и опорожнения.

Рассмотрим вначале функциональную схему автоматизированного теплового узла с элеваторным присоединением системы отопления к тепловым (рис. 11.1).

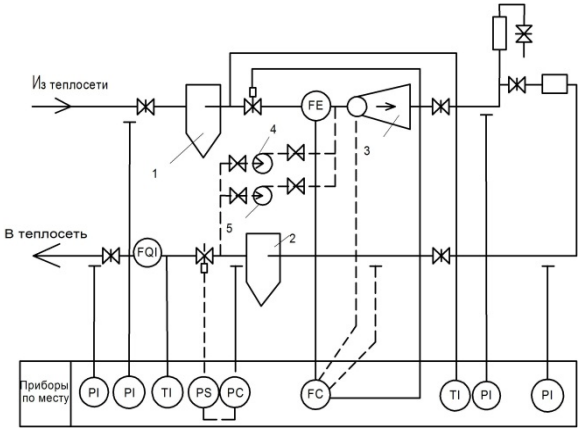



Рис. 11.1. Функциональная схема автоматизации теплового ввода:
*1, 2* – грязевики; *3* – элеватор; *4, 5* – лопастные центробежные насосы

Для поддержания постоянного расхода теплоносителя на подающем трубопроводе установлен регулятор расхода прямого действия типа УРРД. Отбор давления можно производить до и после диафрагмы или на подающем (до элеватора *3*) и обратном (пунктирная линия) трубопроводах системы отопления. При уменьшении перепада давле-

ния на диафрагме регулирующий клапан начинает открываться, увеличивая расход теплоносителя, а при увеличении перепада постепенно закрывается. Таким образом поддерживается постоянный расход теплоносителя в системе отопления. Для местного контроля давления и температуры теплоносителя установлены технические манометры и термометры. Расход теплоносителя определяется с помощью водомера. При непосредственном присоединении системы отопления схема автоматизации аналогична рассмотренной.

Если статическое давление системы отопления выше статического давления тепловой сети, то для предотвращения опорожнения системы и защиты сети от повышения давления на обратном трубопроводе устанавливают регулятор давления. Так, в системе автоматизированного теплового узла с защитой системы от опорожнения постоянство расхода теплоносителя обеспечивается регулятором расхода прямого действия, установленным на подающем трубопроводе, а защита от опорожнения осуществляется регулятором давления прямого действия совместно с блокировочным реле (на рис. 11.1 показан пунктиром). Блокировочное реле настраивается на срабатывание при достижении предельно допустимого низкого давления, сигнал передается на регулятор давления, и клапан закрывается, предохраняя систему от опорожнения.

При необходимости защиты теплового узла от повышенного давления устанавливается регулятор расхода прямого действия совместно с блокировочным реле в подающей магистрали тепловой сети. При повышении давления в подающем трубопроводе срабатывает блокировочное реле и закрывается регулятор.

В нормальном режиме регулятор поддерживает постоянный расход теплоносителя, поступающего в систему отопления. При работе с недостаточным напором используется схема тепловых вводов с насосным подмешиванием (на рис. 11.1 показана пунктиром). В этом случае постоянное давление теплоносителей в прямой и обратной линиях поддерживается регуляторами давления прямого действия. Вода из обратной линии поддерживается насосом *4*, насос *5* является резервным.

## 11.3. Автоматизация теплового режима помещения

Тепловой режим отапливаемых помещений определяется как результат совокупного влияния непрерывно изменяющихся внешних и внутренних возмущающих воздействий. К внешним тепловым воздей-

ствиям относятся изменения температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра, интенсивности солнечной радиации, влажности воздуха; к внутренним возмущающим воздействиям в жилых зданиях – выделение тепла при приготовлении пищи, работа электрических осветительных приборов, тепло, выделяемое людьми, и др.

Регулирующими (управляющими) воздействиями, которые должны обеспечить стабилизацию температурного режима помещений или его изменение во времени по заданной программе, являются температура и расход теплоносителя, поступающего в нагревательные приборы, а также продолжительность его подачи. Применение автоматического регулирования в системах центрального отопления дает значительный технико-экономический эффект.

Как уже отмечалось, способы регулирования подразделяются на три группы: центральное регулирование на тепловом вводе; регулирование по отдельным зонам – зонное регулирование; индивидуальное регулирование каждого нагревательного прибора.

В зависимости от назначения здания, его ориентации, конструкции наружных ограждений и нагревательных приборов регулирование осуществляется: по отклонению внутренней температуры в «представительных» (контрольных) помещениях; по возмущению (изменению температуры наружного воздуха, скорости ветра, интенсивности солнечной радиации); по отклонению внутренней температуры внутри физической тепловой модели здания. В физической модели температура воздуха, равная температуре воздуха в здании, поддерживается с помощью электрического нагревателя. Датчики температуры, находящиеся внутри модели, дают сигнал, и через регулятор осуществляется управление регулирующим клапаном, установленным на линии подачи тепла в здание.

При *центральном регулировании* осуществляется позиционное или пропорциональное изменение количества теплоты, поступающей в здание из тепловой сети, в зависимости от изменения температуры воздуха в контрольных помещениях или температуры наружного воздуха. На рис. 11.2, *а* представлена широко распространенная схема регулирования системы отопления с элеваторным смесителем. Перед элеватором установлен регулирующий клапан с электроприводом, а в контрольном помещении – датчик позиционного регулятора. При изменении температуры воздуха в контрольном помещении срабатывает реле регулятора и регулирующий клапан при этом открывается или закрывается. В здании может быть выбрано не одно, а несколько кон-

трольных помещений и устанавливается соответствующее число позиционных регуляторов.

Двухпозиционное изменение расхода тепла, предусмотренное схемой автоматического регулирования, связано с тепловой разрегулировкой системы отопления: при периодических отключениях системы отдаленные (по ходу воды) приборы получают в среднем за сутки меньшее количество теплоты, чем расположенные близко. Поскольку с повышением частоты отключений тепловая разрегулировка увеличивается, рассмотренная схема регулирования применяется или для малопротяженных систем отопления, или при условии отключения подачи теплоносителя в здание не более 3–4 раз в сутки.

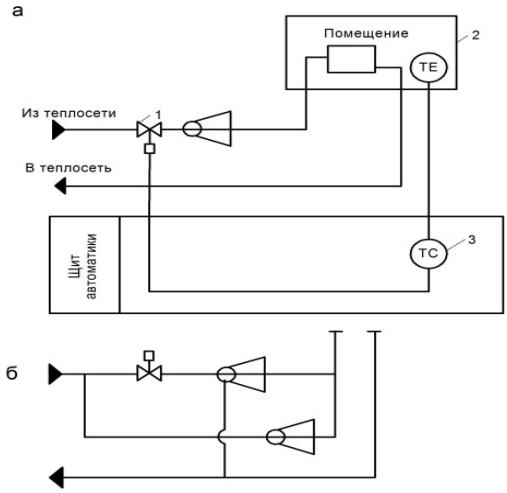



Рис. 11.2. Функциональная схема автоматизации элеваторной системы отопления: *а* – с одним элеватором; *1* – регулирующий клапан; *2* – датчик; *3* – регулятор; *б* – система с двумя элеваторами

Более высокое качество регулирования температуры воздуха в помещениях достигается при установке на вводе двух элеваторов (рис. 11.2, *б*). Один из элеваторов является нерегулируемым и обеспечивает пропуск в систему отопления минимально заданного расхода воды из тепловой сети. Регулирующий клапан устанавливается перед вторым элеватором. Схема автоматизации узла с двумя элеваторами аналогична схеме автоматизации узла с одним элеватором.

На рис. 11.3 представлена схема автоматизации системы отопления с независимым подключением (через бойлер), которая построена на элементах системы промышленной пневмоавтоматики «Старт».

Основной задачей системы автоматики является поддержание температуры теплоносителя в соответствии с отопительным графиком. Регулируемое значение температуры воды, поступающей в систему отопления, изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха. Регулирование производится манометрическими показывающими приборами *2 и 3* с пневматическим выходным сигналом, контролирующими температуру наружного воздуха и теплоносителя. При температуре наружного воздуха *t* на пневмопривод регулирующего клапана поступает управляющее воздействие от пропорционально-интегрального блока, обеспечивающее поддержание температуры теплоносителя *T* согласно отопительному графику. При отклонении температуры теплоносителя прибор *2* изменяет давление сжатого воздуха, поступающего на блок, в результате чего изменяется давление выходного сигнала блока, воздействующего на пневмопривод регулирующего клапана. Регулирующий клапан в зависимости от изменения температуры теплоносителя увеличивает или уменьшает подачу воды из тепловой сети.

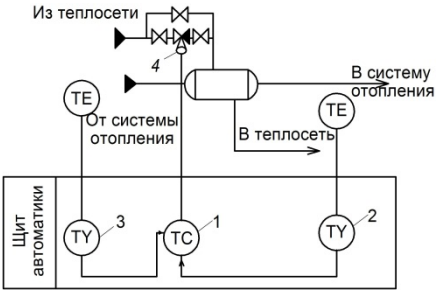



Рис. 11.3. Функциональная схема автоматизации системы отопления с независимым присоединением: *1* – пропорционально-интегральный блок; *2, 3* – показывающие приборы; *4* – регулирующий клапан

В случае, когда с помощью центрального регулирования невозможно поддерживать температуру воздуха в отапливаемых помещениях с достаточной точностью, применяется *зонное регулирование,* которое позволяет учитывать влияние изменений условий погоды (ветра, солнечной радиации) на различные зоны здания по высоте и по стра-

нам света. Зонное деление систем отопления может быть пофасадным (вертикальным) или поэтажным (горизонтальным).

Наибольшее распространение получили схемы с пофасадным регулированием. Все отапливаемые помещения разделяются на зоны, одинаково ориентированные относительно стран света. В каждой зоне выбираются контрольные помещения, в которых устанавливаются датчики регуляторов температуры, соединенных по схеме (рис. 11.4), аналогичной схеме центрального регулирования.

При повышении температуры воздуха в отапливаемых помещениях от регуляторов *1* и *2* поступает сигнал на исполнительные механизмы регулирующих клапанов *3* и *4* и клапаны закрываются. При понижении температуры воздуха в помещениях ниже нормы регулирующие клапаны открываются. Зонное регулирование в зависимости от аккумуляционной способности отапливаемых помещений может быть двухпозиционным или пропорциональным.

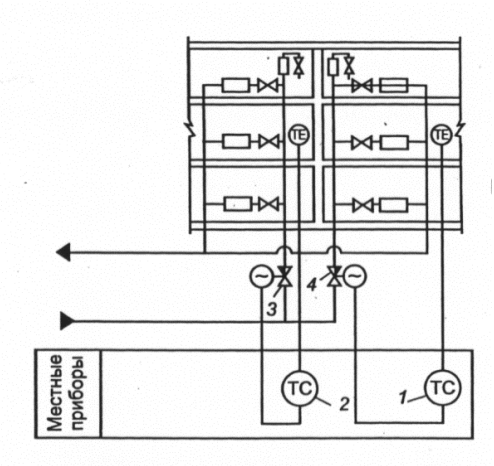



Рис. 11.4. Функциональная схема автоматизации системы отопления с пофасадным регулированием

*Регулирование каждого нагревательного прибора* позволяет учитывать специфические условия различных помещений и менять режим отопления в соответствии с индивидуальными запросами.

Индивидуальное регулирование мощности нагревательных приборов может быть осуществлено путем изменения количества воды, по-

ступающей в прибор, либо путем изменения конвективного или лучистого потока, поступающего от нагревательного прибора. Наиболее распространенным способом является регулирование путем изменения количества воды, поступающей в прибор. С этой целью используются регуляторы прямого действия, устанавливаемые на каждом нагревательном приборе.

## 11.4. Автоматизация водяных систем отопления

Основная задача автоматизации водяных систем отопления – стабилизация температуры воздуха. В последние годы все шире применяется программное регулирование отпуска теплоты на отопление, которое обеспечивает снижение температуры воздуха в отапливаемых помещениях административных и производственных зданий в ночное время, в выходные и праздничные дни. Для этих целей на различных объектах в нашей стране используется комплект оборудования для автоматизации и учета тепла, который позволяет: снизить потребление тепла системой отопления на 25–30 % за отопительный период; обеспечить точное поддержание комфортной температуры воздуха в помещениях; упростить монтаж, настройку, регулирование и эксплуатацию систем отопления. Схема автоматизации систем отопления, построенная на базе такого комплекта, приведена на рис. 11.5. По этой схеме автоматизация внутренней части системы отопления, а также для индивидуального регулирования выполняется с помощью радиаторных терморегуляторов (термостатов) *1*, которые поддерживают заданную температуру воздуха в помещении в соответствии с выбранной температурной настройкой поворотом настроечной рукоятки с указателем до желаемого значения, автоматически изменяя расход теплоносителя через отопительный прибор (радиатор или конвектор).

Регулирующий прибор *2*, получая информацию о наружной температуре по датчику температуры наружного воздуха *4*, поддерживает температурный график в подающей магистрали системы отопления по датчику *5*, а также осуществляет контроль температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления по датчику *6*. Регулирующий прибор *2* поддерживает соответствующий данной местности и данному объекту отопительный график через регулирующий клапан с электроприводом *3*, изменяя количество сетевой воды, поступающей в систему отопления. Насос *8* на смесительной или подающей линии обеспечивает постоянный подмес воды из обратного трубопровода и циркуляцию воды в системе отопления. С целью экономии теплопотреб-

ления регулирующий прибор *2* может осуществлять ночное понижение температурного графика, а также понижение графика в выходные дни в соответствии с таймером.

Регулятор перепада давления *9* обеспечивает постоянный перепад давления на вводе независимо от колебаний давления перед ним, тем самым обеспечивая стабильное регулирование в системе отопления. Обратный клапан *11* (рис. 11.5, *а*) устанавливается для защиты от попадания воды из подающей магистрали в обратную магистраль при остановке насоса. На рис. 11.5, *б* номером *11* обозначен автоматический ограничитель температуры обратной воды прямого действия. Фильтр сетчатый *12* с шаровым краном для промывки на вводе в систему обеспечивает очистку воды от твердых взвесей.

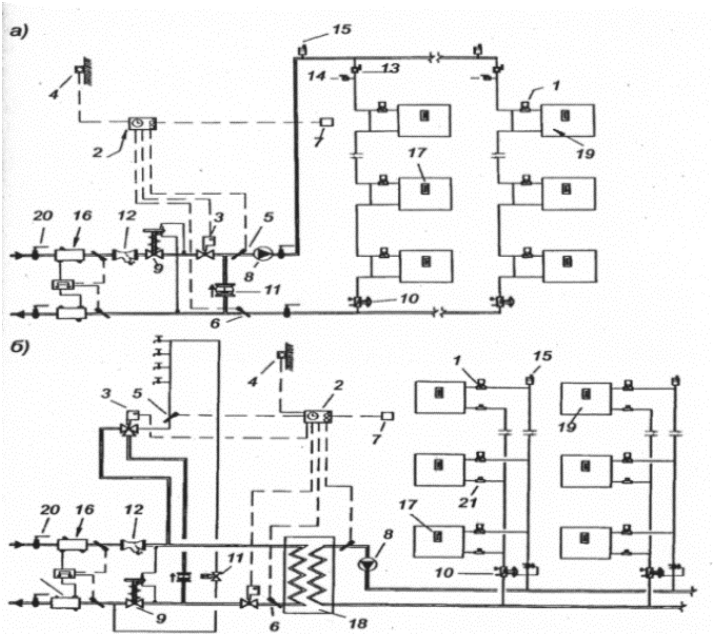



Рис. 11.5. Схемы автоматизации систем отопления зданий: *а* – однотрубная система отопления со смесительным насосом; *б* – двухтрубная система отопления с теплообменником и открытым водозабором на горячее водоснабжение

Шаровые краны *13* и *14* устанавливаются для герметичного отключения стояков и опорожнения системы отопления. При этом в откры-

том состоянии во время работы системы шаровые краны практически не создают дополнительных сопротивлений. Они также могут быть установлены на всех ответвлениях на вводе в здание и в тепловом пункте. Для отключения системы от трубопроводов теплоснабжения могут использоваться дисковые поворотные затворы *20*. В случае протяженной и разрегулированной системы отопления на стояках необходимо устанавливать балансовые клапаны: регуляторы расхода прямого действия *10* (см. рис. 11.5, *а*) для автоматического поддержания расчетного расхода воды в однотрубной системе отопления или регуляторы перепада давления *10* (рис. 11.5, *б*) для автоматического поддержания расчетного перепада давления на стояках в двухтрубной системе отопления. Кроме того, они позволяют перекрыть и опорожнить стояк. Для отключения (демонтажа) отопительного прибора и слива воды из него могут использоваться запорные клапаны *21*. Автоматические воздухоотводчики *15* обеспечивают автоматический выпуск воздуха при заполнении и в процессе работы системы отопления. Измерение теплопотребления зданием осуществляется с помощью ультразвукового тепломера *16*, расходомерная часть которого устанавливается на подающей и (или) обратной магистрали. Расход воды определяется на основании разницы по времени прохождения посланных одновременно ультразвуковых сигналов по ходу и против хода воды. Интегратор перемножает расход воды на разницу температур подающей и обратной воды, тем самым определяя расход тепла. При необходимости организовать поквартирный учет: тепла на радиаторах устанавливаются испарительные тепломеры *17*.

## 11.5. Автоматизация систем воздушного отопления и воздушных тепловых завес

Для производственных помещений широко применяют системы воздушного отопления. Как правило, в помещениях устанавливают отопительные агрегаты, состоящие из вентилятора и калорифера.

В качестве примера можно привести принципиальную схему автоматизации отопительного агрегата (рис. 11.6). В отапливаемом помещении установлен позиционный регулятор температуры, а на трубопроводе перед калорифером – соленоидный вентиль. При повышении температуры воздуха в помещении с помощью регулятора температуры выключается электродвигатель и закрывается соленоидный вентиль, прекращая подачу теплоносителя в калорифер. При понижении температуры воздуха включается электродвигатель вентилятора и соленоидный вентиль открывается.

Распространен также способ регулирования температуры воздуха помещения за счет регулирования теплопроизводительности отопительного агрегата путем изменения расхода сетевой воды через воздухоподогреватель. На рис. 11.6, *а* приведена схема отопительного агрегата с вентилятором. При понижении температуры воздуха в помещении ниже заданного срабатывает двухпозиционный регулятор и открывается клапан по линии теплоносителя (к воздухоподогревателю). Одновременно по команде этого регулятора включается вентилятор. При достижении заданной температуры регулятор дает команду на закрытие клапана и выключение вентилятора.

Разновидностью установок воздушного отопления являются воздушно-тепловые завесы непрерывного и периодического действия.

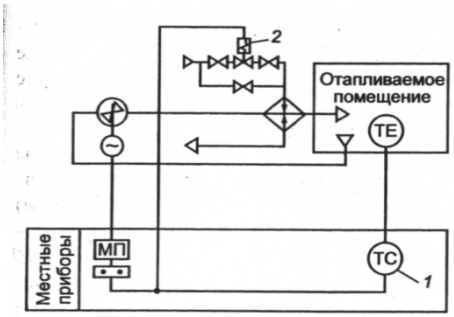



Рис. 11.6. Функциональная схема регулирования отопительного агрегата:
*1* – регулятор температуры; *2* – соленоидный вентиль

При автоматизации периодически действующих установок воздушно-тепловой завесы широко применяется схема на рис. 11.7, *б*.

При открытии ворот (дверей) по команде концевого выключателя открывается клапан на линии теплоносителя к воздухоподогревателю и включается вентилятор. При открытых воротах температура воздуха в их зоне естественно снижается даже при включенной установке, которая продолжает работать и после закрытия ворот. При этом температура воздуха в зоне ворот постепенно повышается.

Когда температура воздуха достигнет заданного значения, срабатывает двухпозиционный терморегулятор, который закрывает клапан на линии теплоносителя и выключает вентилятор.

Схемой предусматривается ручное управление воздушно-тепловой завесы. При условии кратковременного открытия ворот установка воз-

душно-тепловой завесы включается и выключается по команде концевого выключателя.

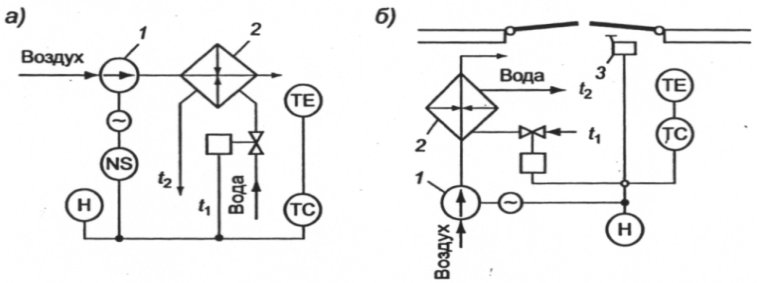



Рис. 11.7. Схема автоматизации установок воздушного отопления (*а*) и воздушно-тепловой завесы (*б*): *1* – вентилятор; *2* – воздухоподогреватель; *3* – концевой выключатель

## 11.6. Автоматизация теплоснабжения коттеджей

Высокие темпы строительства коттеджей и индивидуальных домов выдвинули задачу автоматизации систем их теплоснабжения.

Радиаторные терморегуляторы *7* поддерживают заданную температуру воздуха в помещениях (в соответствии с температурной настройкой – поворотом настроечной рукоятки с указателем до желаемого значения), автоматически изменяя расход греющей воды через прибор отопления. Электронный программируемый термостат *11* (рис. 11.8, *а*) получает информацию о температуре воздуха в контрольном помещении по датчику температуры внутреннего воздуха, который либо поставляется вмонтированным в корпус термостата, либо в выносном исполнении (по заказу).

В зависимости от температуры в помещении прибор посылает сигнал на регулирующий клапан с электроприводом *12* и, таким образом, изменяет расход греющей воды в контуре отопления. Кроме того, электронный программируемый термостат *11* получает информацию о температуре воды в емкости (баке) горячей воды *3* от поверхностного термостата *14* и поддерживает выбранное значение температуры в емкости, посылая сигнал на регулирующий клапан *13* с электроприводом и, таким образом, изменяя расход воды на горячее водоснабжение.

В случае появления водоразбора на горячее водоснабжение температура воды в емкости горячей воды *3* понижается. Это фиксирует по-

верхностный термостат *14* и посылает сигнал на термостат *11*, который, в свою очередь, открывает регулирующий клапан *13*, включает котел *1* и насос *5* и, таким образом, обеспечивает расход греющей воды через емкость горячей воды *3*. Поддержание температуры в помещении осуществляется по встроенному в комнатный термостат *11* таймеру в соответствии с выбранным вами графиком (до шести интервалов с разной требуемой температурой в помещении в рабочие дни и дополнительно до шести интервалов в выходные дни) и позволяет максимально отвечать стилю жизни владельцев коттеджа.

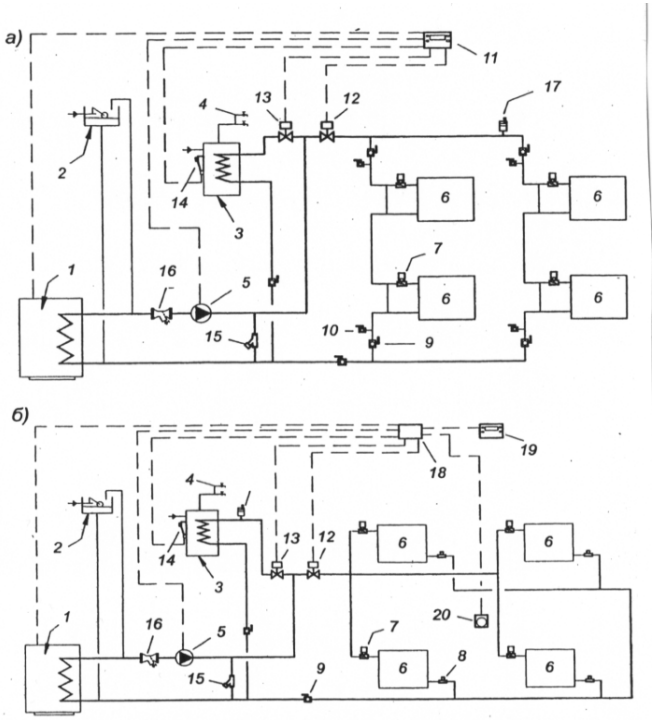



Рис. 11.8. Схема автоматизации (*а*) с электронным программируемым термостатом (схема отопления однотрубная) и (*б*) с клемной коробкой и программатором (система отопления двухтрубная)

Кроме того, имеется независимый встроенный таймер для системы горячего водоснабжения, обеспечивающий два периода – включение

(выключение) каждые 24 ч для емкости горячей воды *3*. Насос *5* и котел *1* включены постоянно, пока есть необходимость в греющей воде либо со стороны системы отопления, либо со стороны емкости горячей воды *3*.

# 12. АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

## 12.1. Автоматизация систем горячего водоснабжения

Основная задача автоматического регулирования систем горячего водоснабжения – поддержание заданной температуры воды в местах ее разбора. Это можно осуществить с помощью индивидуальных регуляторов температуры в каждом месте разбора горячей воды. Однако такое решение существенно усложняет эксплуатацию систем горячего водоснабжения и является малоэффективным. Поэтому индивидуальные регуляторы в местах разбора горячей воды устанавливаются лишь в особых случаях.

Наряду с непосредственным водоразбором системы горячего водоснабжения промышленных и гражданских зданий присоединяются к тепловым сетям также через водяные или пароводяные подогреватели.

При схеме с непосредственным водоразбором вода в систему подается из прямой и обратной линий тепловой сети в соотношениях, обеспечивающих температуру смеси 60 °С. Регулирование постоянной температуры смеси, осуществляется терморегулятором, работающим в комплекте со смесительным регулирующим клапаном. Регулирующий клапан имеет два подводящих патрубка и один патрубок на выходе. К подводящим патрубкам присоединяются трубопроводы от прямой и обратной линий тепловой сети, а выходной патрубок соединен с трубопроводом систем горячего водоснабжения. При повышении температуры воды, поступающей в систему горячего водоснабжения, увеличивается подача воды в систему из обратной линии тепловой сети, а при понижении – из прямой линии тепловой сети.

При автоматизации системы горячего водоснабжения, присоединенной к тепловой сети с помощью водоводяного подогревателя, регулирование температуры воды, подаваемой в систему, осуществляется регулятором прямого действия. При повышении температуры воды в системе горячего водоснабжения прикрывается клапан регулятора, уменьшая подачу горячей воды из теплосети в бойлер, а при понижении – открывается.

Системы горячего водоснабжения в зависимости от назначения объекта бывают с циркуляцией воды только при ее разборе (тупиковая система) и с циркуляцией воды при отсутствии водоразбора или при незначительном водоразборе. При отсутствии водоразбора или при незначительном водоразборе вода в системе горячего водоснабжения может значительно охладиться. Чтобы избежать этого, устанавливают центробежный насос и монтируют циркуляционную линию трубопроводов. Датчик манометрического двухпозиционного регулятора устанавливают на циркуляционной линии. При понижении температуры воды в системе горячего водоснабжения примерно до 45 °С срабатывает двухпозиционный регулятор и включается электродвигатель центробежного насоса, начинаются принудительная циркуляция воды в системе и подогрев ее в бойлере. При достижении температуры воды в циркуляционной линии 60–65 °С регулятор срабатывает и отключает электродвигатель насоса.

Для обеспечения качественного снабжения потребителей горячей водой необходима непрерывная работа циркуляционного насоса. Если работа насосов в ночное время не предполагается, то предусматривается их автоматическое выключение. При установке аккумуляторов для выравнивания графика отпуска теплоты на горячее водоснабжение предусматривается автоматическое управление зарядкой и разрядкой этих аккумуляторов. Выбор схемы автоматического регулирования температуры воды на горячее водоснабжение определяется принятой системой теплоснабжения (закрытая или открытая).

При закрытой системе теплоснабжения, когда на вводах горячего водоснабжения устанавливают водоводяные подогреватели, широко применяется схема регулирования температуры нагреваемой воды путем изменения количества сетевой воды (рис. 12.1, *а*, *б*, *в*) или путем разделения потока сетевой воды трехходовым регулирующим клапаном на два: поступающий поток направляется в подогреватель, а перепускаемый – по обводной линии (рис. 12.1, *г*).

При таком способе регулирования обеспечивается примерно постоянный расход сетевой воды, что исключает полностью или частично гидравлическую разрегулировку тепловой сети. Однако постоянство расхода сетевой воды приводит к завышению температуры воды в обратном трубопроводе тепловой сети в период малых нагрузок горячего водоснабжения.

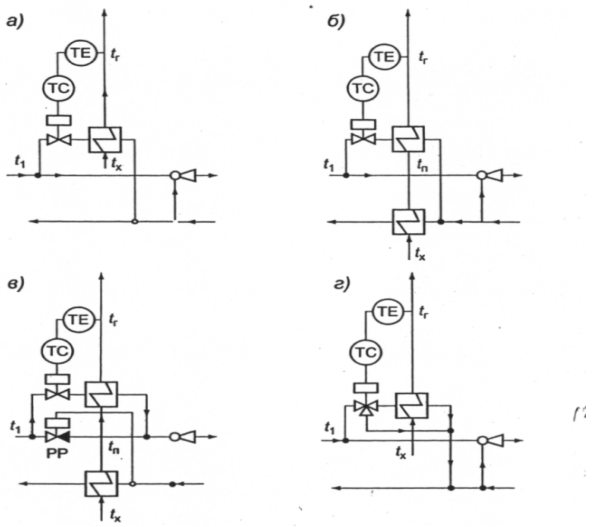



Рис. 12.1. Схемы автоматического регулирования температуры воды горячего водоснабжения при закрытой системе теплоснабжения: *а* – параллельная; *б* – смешанная двухступенчатая; *в* – двухступенчатая последовательная; *г* – схема с трехходовым регулирующим клапаном; ТС – регулятор температуры; РР – регулятор расхода; ТЕ – измеритель температуры

При теплоснабжении от ТЭЦ это нежелательно, поскольку на ТЭЦ снижается выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

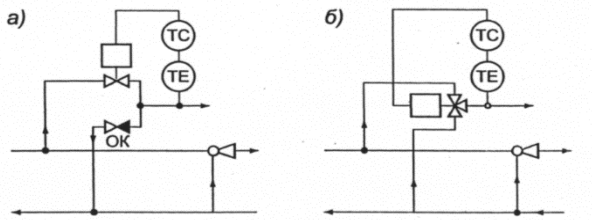



Рис. 12.2. Схемы автоматического регулирования температуры воды горячего водоснабжения при открытой системе теплоснабжения с двухходовым (*а*) и трехходовым (*б*) регулирующим клапаном

При открытой системе теплоснабжения на узлах горячего водо-

снабжения отсутствуют водоводяные подогреватели, горячая вода к потребителю поступает непосредственно из тепловой сети. Температура воды, поступающей в систему горячего водоснабжения, регулируется смешением потоков воды из подающего и обратного трубопроводов тепловой сети.

Большое распространение получили также схемы с установкой регулирующего клапана на подающем трубопроводе и обратного клапана на обратном трубопроводе (рис. 12.2, *а*) и с применением трехпроводного клапана смешения (рис. 12.2, *б*).

## 12.2. Автоматическое управление насосами

В зависимости от назначения насосной установки система автоматического регулирования должна обеспечить поддержание в требуемых пределах давления, расхода и температуры воды. Кроме того, при аварийной остановке рабочего насоса должен автоматически включаться резервный. Для дистанционного контроля работы насосной установки предусматривается сигнализация и при необходимости – автоматическая запись температуры, расхода и давления воды.

Предположим, что при внезапной остановке рабочего насоса давление теплоносителя на линии нагнетания резко падает. Эта зависимость и положена в основу работы схемы автоматизации, обеспечивающей включение резервного насоса при аварийной остановке рабочего.

На нагнетательной линии после насосов устанавливают позиционный регулятор давления, настроенный на рабочее давление системы отопления. При остановке рабочего насоса давление теплоносителя снижается, срабатывает регулятор давления, выключаются магнитный пускатель электродвигателя насоса и сигнальная лампа. Одновременно включается в работу резервный насос и загорается соответствующая сигнальная лампа. С помощью ключа осуществляется выбор режима управления работой установки. При автоматизации насосов бывают случаи, когда разность давления теплоносителя при включенном и выключенном насосе меньше чувствительности регулятора давления. В этом случае искусственно увеличивают гидравлическое сопротивление сети путем установки диафрагмы.

Для автоматического поддержания постоянного давления на нагнетательной линии насосов установлен регулятор давления прямого действия *2* (рис. 12.3).

В зависимости от изменения давления в системе регулирующий

клапан открывается или закрывается, поддерживая постоянное давление в точке *А*. Постоянное давление в системе может поддерживаться и передачей части теплоносителя в обратную линию. Для этого между прямой и обратной линиями теплоносителя монтируют перемычку, на которой устанавливают регулятор давления прямого действия (пунктирная линия).

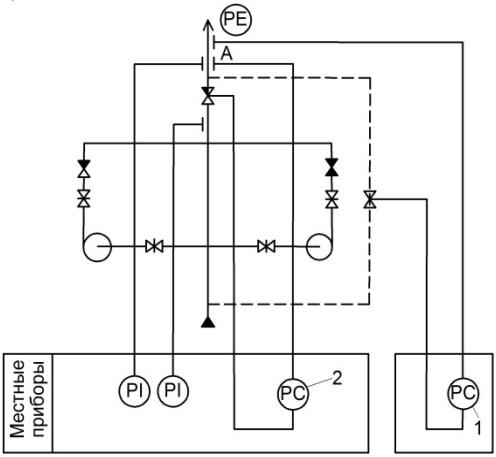



Рис. 12.3. Функциональная схема автоматического поддержания постоянного давления теплоносителя

При повышении давления в точке *А* клапан открывается, часть теплоносителя из прямой линии поступает в обратную и тем самым поддерживается постоянное давление в системе. Рассмотренный способ регулирования может быть применен только в том случае, если перепуск горячей воды в обратную линию не вызывает нарушения установленного температурного графика теплоносителя в обратной линии.

Более сложны схемы автоматизации насосных подстанций, основное назначение которых состоит в изменении давления в подающем или обратном трубопроводе за подстанцией, а также в увеличении пропускной способности тепловой сети (рис. 12.4).

Автоматизация насосных подстанций на подающей магистрали (рис. 12.4) включает решение задач: блокировки насосных агрегатов, электродвигателей насоса и задвижки на напорном патрубке насоса; автоматического включения резервного насоса при падении давления в напорном патрубке работающего и автоматического переключателя на

резервный источник электропитания; сигнализации о неисправностях работы насосной подстанции (превышении допустимой температуры в подшипниках насосов, автоматическом включении резервного насоса, понижении давления воды за насосами и др.).

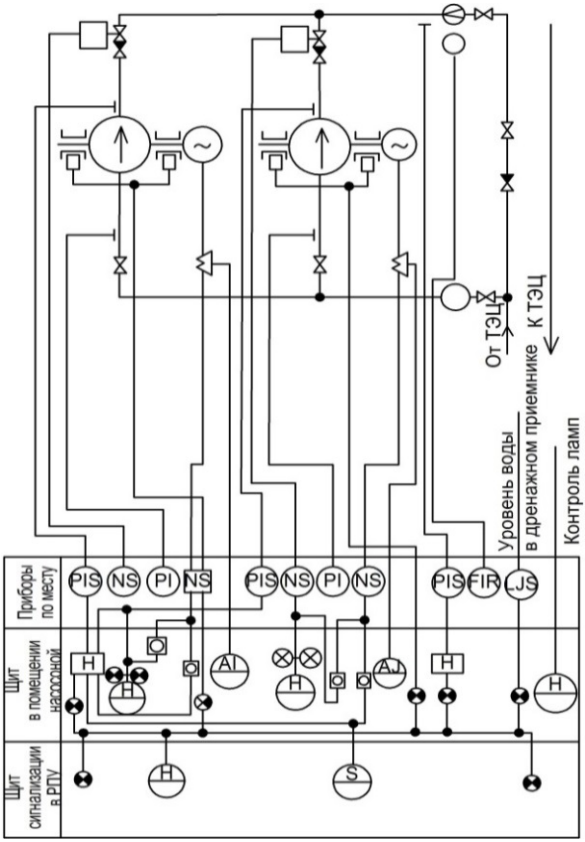



Рис. 12.4. Схема автоматизации насосной подстанции на подающей магистрали

При автоматизации насосной подстанции на обратной магистрали (рис. 12.5) дополнительно предусматривается поддержание постоянного давления во всасывающем коллекторе, поскольку колебания давления существенно влияют на надежность работы отопительных систем.

Автоматическая защита от понижения давления во всасывающем коллекторе перекачивающей подстанции действует при аварийных ситуациях.

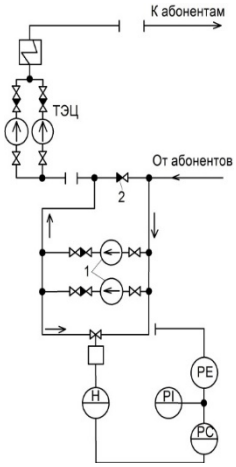



Рис. 12.5. Схема регулирования давления воды во всасывающем коллекторе насосной подстанции на обратной магистрали:
*1* – насосы подстанции; *2* – обратный клапан

В этом случае автомат рассечки разделяет тепловую сеть на две гидравлически независимые зоны: верхнюю (с высокой отметкой пьезометра после срабатывания защиты) и нижнюю (с низкой отметкой пъезометра).

Основной причиной резких и значительных по величине понижений давления воды во всасывающем коллекторе насосных подстанций на обратных трубопроводах является остановка насосов подстанции или сетевых насосов на станции, что может быть вызвано различными неисправностями, в том числе прекращением подачи электроэнергии.

В связи с этим в схеме защиты используются не электрические, а гидравлические регуляторы давления, например РД-3А с регулирующим клапаном РК, которые получают импульс от давления на всасывающем коллекторе насосной подстанции. Регулирующие клапаны РК с мембранным приводом устанавливают на подающей магистрали подстанции.

Полного разделения тепловой сети на две гидравлические независимые зоны не требуется в том случае, когда давление в обратной ма-

гистрали во время остановки насосной подстанции не превышает допустимого предела при некотором сокращенном расходе воды, который можно обеспечить частичным прикрытием регулирующего клапана. В таких случаях целесообразно применять двухседельные регулирующие клапаны. При частичном закрытии регулирующего клапана снижается вероятность возникновения гидравлического удара.

## 12.3. Автоматизация хозяйственно-питьевого и противопожарного водоснабжения

В зависимости от напора в точке присоединения к наружной сети внутренняя водопроводная система выполняется либо путем непосредственного присоединения без насосов и резервуаров, если напор в наружной сети достаточен для подачи воды ко всем водоразборным точкам внутри здания, либо с насосами постоянного или периодического действия, если напора в наружной сети постоянно или периодически не хватает для подачи воды ко всем водоразборным точкам.

Система непосредственного присоединения оборудуется лишь измерителем расхода счетчиком-расходомером (водомером). В системе водоснабжения с насосами периодического действия (рис. 12.6) рабочий насос включается с помощью позиционного регулятора давления при понижении расчетного давления воды, поступающей из городской сети.

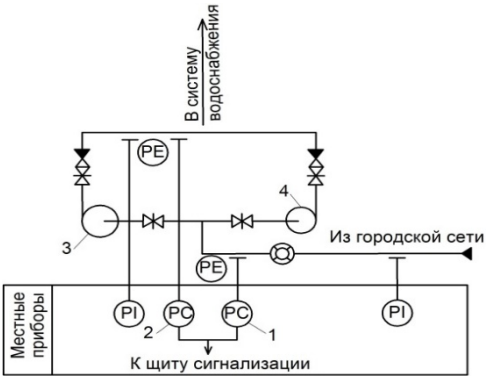



Рис. 12.6. Функциональная схема автоматизации системы водоснабжения с насосами периодического действия: *1*, *2* – регуляторы давления; *3* – рабочий насос; *4* – резервный насос

При повышении давления воды в городской сети насос выключается с помощью того же регулятора. Автоматическое включение резервного насоса при аварийном состоянии рабочего осуществляется позиционным регулятором давления *2*.

В схеме автоматизации системы водоснабжения с напорным резервуаром и периодически действующими насосами (рис. 12.7) включение и выключение насоса осуществляются регулятором уровня, датчики которого установлены в напорном резервуаре. При опускании воды в баке до нижнего уровня (линия *б*) включается насос и вода начинает поступать в бак. Когда вода в баке достигнет верхнего уровня (линия *а*), насос отключится.

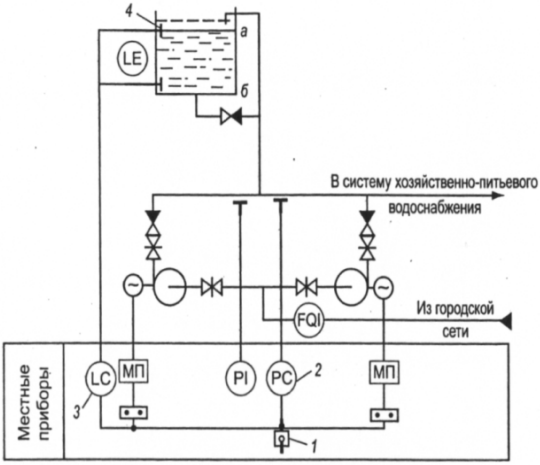



Рис. 12.7. Функциональная схема автоматизации системы водоснабжения с напорным резервуаром: *1* – ключ; *2* – регулятор давления; *3* – регулятор уровня; *4* – напорный резервуар

При выходе из строя рабочего насоса включается резервный с помощью регулятора давления. Ручное или автоматическое управление насосами выбирается с помощью ключа.

В промышленных зданиях широко распространены автоматические (спринклерные) и полуавтоматические (дренчерные) системы. Трубопроводы автоматических противопожарных систем прокладывают под потолком помещения.

На трубопроводах устанавливают спринклеры (рис. 12.8), закрытые стеклянным колпаком, который удерживается в закрытом положении замком из пластинок, соединяемых между собой легкоплавким сплавом.

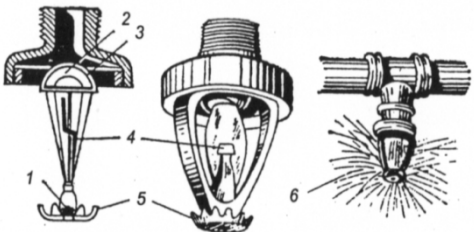



Рис. 12.8. Спринклерные головки: *1* – замок с припоем; *2* – колпак; *3* – диафрагма; *4* – бронзовое кольцо с рамой; *5* – разбрызгивающая розетка; *6* – спринклер в действии

При возникновении пожара и повышении температуры в помещении до 72–93 °С припой расплавляется, распадается замок, и вода через отверстия спринклера поступает в помещение.

Спринклерные системы постоянно находятся под давлением воды либо воздуха (при отрицательной температуре помещения). Полуавтоматические противопожарные дренчерные системы оборудованы разбрызгивателями, имеющими всегда открытые отверстия.

Сеть полуавтоматической установки включают при пожаре вручную. Кроме этих систем, в промышленных, жилых и общественных зданиях применяют противопожарные системы с установкой в определенных местах пожарных кранов. Если давление воды в городской сети недостаточно для обеспечения нормальной работы противопожарных устройств, устанавливают противопожарные насосы или пневматические установки.

У каждого пожарного крана (рис. 12.9) установлена кнопка включения рабочего насоса. При нажатии кнопки «Пуск» включается рабочий насос, одновременно с пуском насоса открывается задвижка с электроприводом на байпасе водомера. Блокирование электродвигателя насоса и задвижки исключает вывод из строя водомера при большом расходе воды в случае пожара.

Резервный насос включается автоматически при отказе рабочего.

Принцип действия пневматической установки для повышения

напора воды заключается в следующем (рис. 12.10).

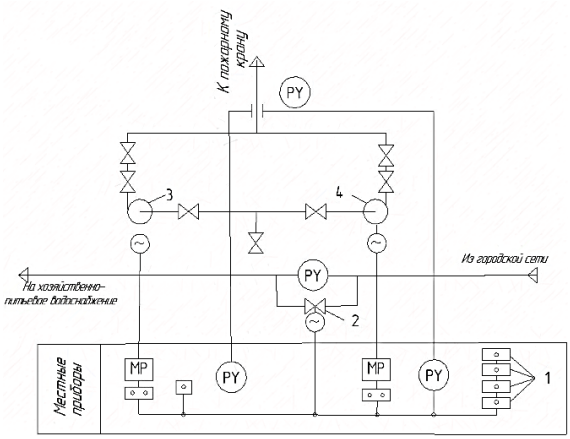



Рис. 12.9. Функциональная схема автоматизации пожарных насосов:
*1* – кнопка; *2* – задвижка; *3* – рабочий насос; *4* – резервный насос

В одном герметически закрытом резервуаре *3* находится вода, а в другом *5* – воздух. Необходимое давление воздуха в резервуаре *5* поддерживается небольшим компрессором, который включается и выключается с помощью позиционного регулятора давления. Воздушный резервуар соединен трубопроводом с водяным, постоянное давление воздуха в котором поддерживается редуктором.

Под давлением воздуха вода поступает в противопожарную систему и поднимается на высоту, соответствующую давлению в резервуаре *3*. Когда уровень воды в резервуаре достигнет нижнего предела, регулятор уровня включит рабочий насос, уровень воды в резервуаре поднимется до верхнего предела и насос остановится. Резервный насос включается автоматически при отказе рабочего по сигналу реле расхода.

В некоторых случаях необходима автоматизация работы различного санитарно-технического оборудования (умывальники, душевые кабины и др.).

Бесконтактные смесители – это запорная сантехническая арматура, оснащенная электронным датчиком, инфракрасным (реагирует на тепловое излучение) или радарной сенсорной электроникой (реагирует на изменение объема в поле действия датчика). Электронные бесконтактные смесители существенно экономят потребление воды, они безопасны в использовании и эксплуатации и обладают повышенными гигие-

ническими качествами, что актуально для санитарных зон в медицинских учреждениях. Область применения бесконтактных смесителей преимущественно объекты коммерческого назначения, общественные санузлы и душевые, где пользователи зачастую забывают или не считают нужным закрывать смеситель после использования.

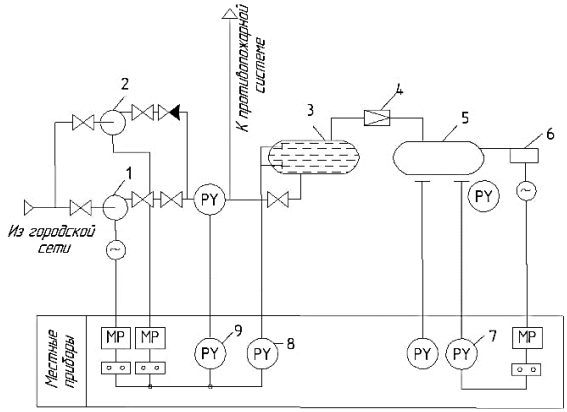



Рис. 12.10. Функциональная схема автоматизации пневматической установки: *1* – рабочий насос; *2* – резервный насос; *3, 5* – резервуары; *4* – редуктор; *6* – компрессор; *7* – регулятор давления; *8* – регулятору ровня; *9* – реле расхода

Чаще в бесконтактных смесителях используется сенсор-индукционный датчик. Индукционный датчик фиксирует изменение поля и передаёт сигнал на электронный блок управления, который задаёт алгоритм работы, например: открыть электромагнитный (соленоидный) клапан при изменении поля и закрыть при его нормализации (рис. 12.11).

Ход воде открывается соленоидным клапаном. Как видно из рис. 12.12, на конце сердечника имеется мембрана, перекрывающая поток воды. Как только сердечник с мембраной поднимается, вода выходит наружу.

На катушку электромагнита подаётся электрическое напряжение, он срабатывает и втягивает металлический сердечник в соленоид. Если напряжение отключить, сердечник с мембраной опустятся обратно, и вода перекроется.

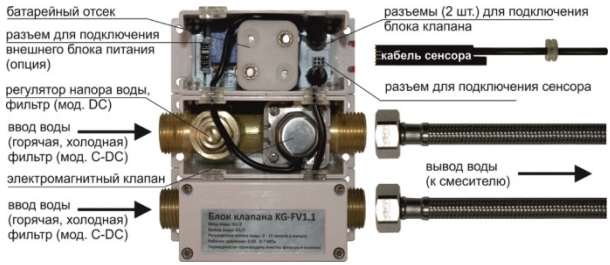



Рис. 12.11. Схема блока управления автоматического смесителя с электромагнитным клапаном

Таким образом, в случае поломки или при разрядке батареек клапан закрывается автоматически.

Краны, как правило, питаются от обычных батареек или от сети через трансформатор (либо комбинируются оба варианта). Поскольку расход электричества невелик, то проще пользоваться батарейками – они безопаснее. Обычно даже в оживлённом общественном месте одной «закладки» хватает на несколько месяцев, если, конечно, не покупать совсем плохие батарейки.

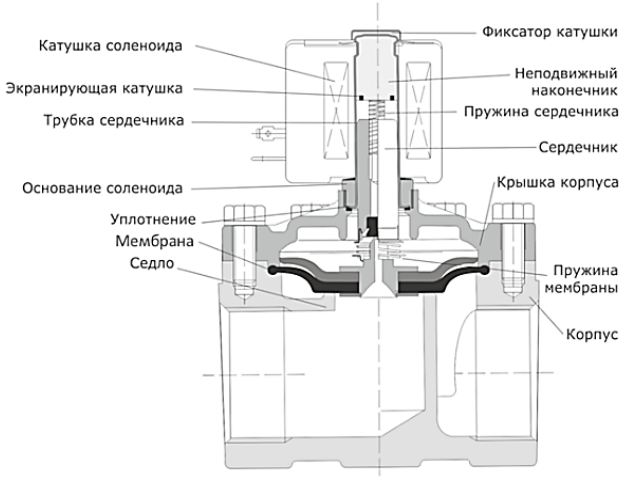



Рис. 12.12. Принцип работы соленоидного клапана

## 12.4. Автоматизация узлов водоотведения зданий

При автоматизации узлов водоотведения (внутренней канализации) решаются задачи автоматического удаления сточных вод из дренажных приямков и защиты подвальных помещений от затопления при засорении канализационных сетей.

При автоматизации насосов дренажных приямков (рис. 12.13) датчики регулятора уровня устанавливаются в приямке на отметке верхнего и нижнего уровней.

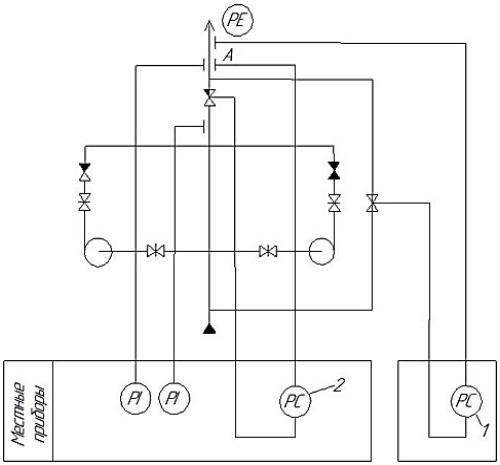



Рис. 12.13. Функциональная схема автоматизации насосов дренажных приямков

По мере заполнения приямка и достижения водой верхнего уровня срабатывает регулятор и включается дренажный насос. Когда уровень воды в дренажном приямке опустится ниже нижнего датчика, насос выключится.

Предусмотрена система автоматического включения резервного насоса при выходе из строя рабочего. Для защиты подвальных помещений от затопления (рис. 12.14) в канализационном колодце на высоте 50–100 мм от верхней отметки лотка устанавливают датчик реле уровня. При засорении канализационной сети уровень сточных вод в колодце поднимется, сработает реле и закроется задвижка с электроприводом.

Реле уровня срабатывает также и при затоплении подвала по сигна-

лу датчика, установленного на 5 см выше нижней отметки пола подвала. Световой или звуковой сигнал о затоплении подается на щит диспетчера.

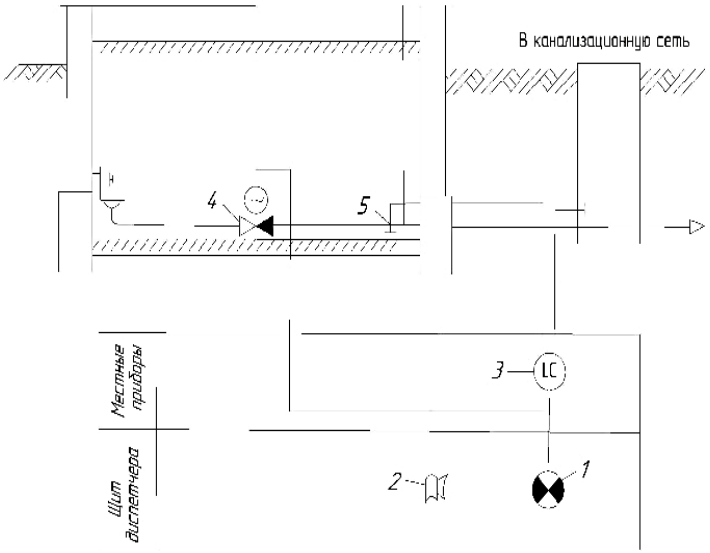



Рис. 12.14. Функциональная схема автоматизации подвальных помещений от затопления: *1* – световой сигнал; *2* – звуковой сигнал; *3* – реле уровня; *4* – задвижка; *5* – датчик

## 12.5. Автоматизация водооборотного водоснабжения

Для охлаждения технологического оборудования (компрессоров, конденсаторов холодильных машин и др.) требуется большое количество воды. Поэтому с целью экономии водопроводной воды устраивают системы оборотного водоснабжения, в которых нагретая технологическим оборудованием вода охлаждается в градирнях. Система оборотного водоснабжения (рис. 12.15) состоит из вентиляторных градирен, сборного бака, циркуляционных насосов и охлаждаемого оборудования (компрессоров).

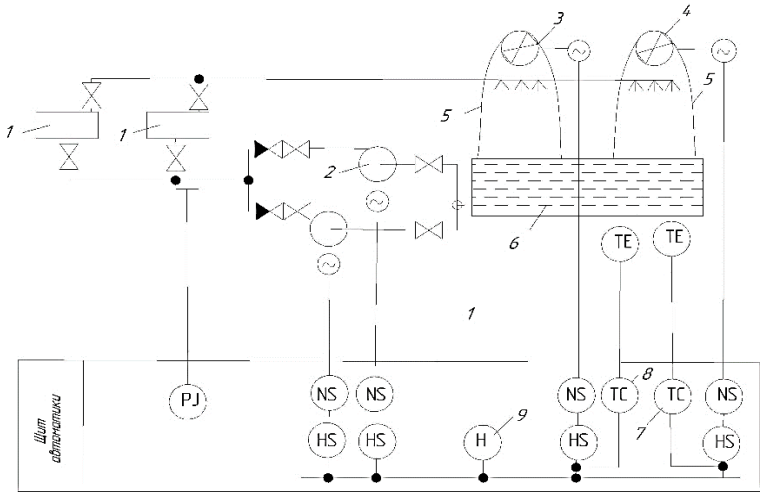



Рис. 12.15. Функциональная схема автоматизации системы охлаждения конденсаторов холодильной установки: *1* – конденсаторы холодильных установок; *2* – насосы; *3, 4* – вентиляторы; *5* – градирни; *6* – сборный бак-аккумулятор; *7, 8* – регуляторы; *9* – переключатель

Требуемая температура воды в сборном баке поддерживается за счет включения определенного числа вентиляторов; электродвигатели технологического оборудования сблокированы с электродвигателями оборудования градирни. При включении электродвигателя компрессора автоматически включается электродвигатель насосов.

Если температура воды в баке ниже температуры настройки регулятора, то ни один из осевых вентиляторов градирни не включится. Когда температура воды в баке превысит температуру настройки регулятора *8,* включится осевой вентилятор *3*. При дальнейшем повышении температуры до величины, превышающей значение настройки регулятора *7*, включится вентилятор *4. Е*сли температура воды в баке понизится, сначала отключится вентилятор *4,* а затем вентилятор *3*. После выключения электродвигателя компрессоров отключаются электродвигатели насоса и вентиляторов. Режим работы (ручной или автоматический) выбирается с помощью переключателя.

# 13. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

## 13.1. Автоматизация приточной системы вентиляции

При регулировании теплопроизводительности приточных систем наиболее распространенным является способ изменения расхода теплоносителя. Применяется также способ автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из приточной камеры путем изменения расхода воздуха. Однако при раздельном применении этих способов не обеспечивается максимально допустимое использование энергии теплоносителя.

С целью повышения экономичности и быстродействия процесса регулирования можно применить совокупный способ изменения теплопроизводительности воздухоподогревателей установки. В этом случае система автоматического управления приточной камерой предусматривает: выбор способа управления приточной камерой (местное, кнопками по месту, автоматическое со щита автоматизации), а также зимнего и летнего режимов работы; регулирование температуры приточного воздуха путем воздействия на исполнительный механизм клапана на теплоносителе; автоматическое изменение соотношения расходов воздуха через воздухоподогреватели и обводной канал; защиту воздухоподогревателей от замерзания в режиме работы приточной камеры и в режиме резервной стоянки; автоматическое отключение вентиляторов при срабатывании защиты от замерзания в режиме работы; автоматическое подключение контура регулирования и открытие приемного клапана наружного воздуха при включении вентилятора; сигнализацию опасности замерзания воздухоподогревателя; сигнализацию нормальной работы приточной камеры в автоматическом режиме и подготовки к пуску.

Система автоматического управления приточной камерой (рис. 13.1) работает следующим образом. Выбор способа управления производится поворотом переключателя *SA1* в положение «ручное» или «автоматическое», а выбор режима работы переключателем *SA2* – поворотом его в положение «зима» или «лето». Ручное местное управление электродвигателем приточного вентилятора *Ml* производится: кнопками SB1 «Стоп» и *SB2* «Пуск» через магнитный пускатель *КМ*; исполнительным механизмом *М2* приемного клапана наружного воздуха кнопками *SB5* «Открытие» и *SB6* «Закрытие» через промежуточные реле и собственные конечные выключатели; исполнительным ме-

ханизмом *M3* клапана на теплоносителе кнопками *SB7* «Открытие» и *SB8* «Закрытие» через промежуточное реле *K5* и собственные конечные выключатели, а также исполнительным механизмом *M4* фронтально-обводного клапана кнопками *SB9*, *SB10*. Включение-выключение электродвигателя *Ml* вентилятора сигнализируется лампой *HL1* «Вентилятор включен», установленной на щите автоматизации.

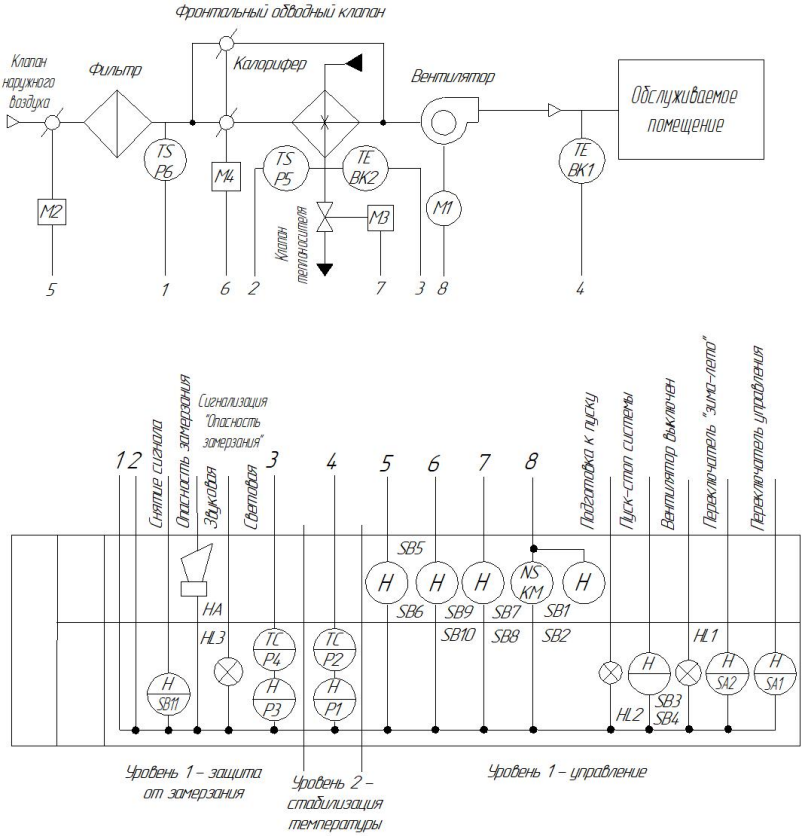



Рис. 13.1. Функциональная схема управления приточной камерой

Включение и выключение приточных систем в автоматическом режиме производится кнопками *SB3* «Стоп» и *SB4* «Пуск», расположенными на щите, через промежуточные реле *K1* и *K2*. При этом перед

включением вентилятора промежуточных реле *К1, К3* и *Кб* обеспечивают принудительное открытие клапана теплоносителя, а после включения вентилятора промежуточное реле *К2* подключает контур регулирования температуры приточного воздуха и защиту от замерзания, а также открывает приемный клапан наружного воздуха.

Поддержание температуры приточного воздуха осуществляется регулятором температуры *Р2* с термисторным датчиком *ВК1*, установленном в приточном воздуховоде; управляющий сигнал через релейно-импульсный прерыватель *D1* подается на исполнительный механизм *М3* клапана на теплоносителе.

Изменение соотношений расходов воздуха через калориферы и обводной канал осуществляется по сигналам регулятора температуры *D4* с датчиком *ВК2*, установленным в трубопроводе теплоносителя. Управляющие сигналы через релейно-импульсный прерыватель *D3* подаются на исполнительный механизм *М4* фронтально-обводного клапана.

Защита воздухоподогревательной установки от замерзания обеспечивается с помощью реле температуры теплоносителя *Р5*, чувствительный элемент которого установлен в трубопроводе теплоносителя сразу за первой по ходу воздуха секцией подогрева, и реле температуры воздуха *Р6*, чувствительный элемент которого установлен в воздуховоде между приемным клапаном наружного воздуха и воздухоподогревательной установкой. В случае опасности замерзания через промежуточное реле *Кб* производятся отключение электродвигателя *Ml* приточного вентилятора, открытие клапана на теплоносителе и включение сигнализации, а также закрытие приемного клапана наружного воздуха.

Возникновение опасности замерзания сигнализируется лампой *HL3* «Опасность замерзания» и звуковым сигналом *НА*. Подготовка вентилятора к пуску после нажатия кнопки *SB4* сигнализируется лампой *HL2* (только для зимнего режима).

## 13.2. Автоматизация работы группы приточных систем

В системах промышленной вентиляции широко распространено использование группы приточных систем, работающих в режиме поддержания одинаковой температуры приточного воздуха. Для этого в схеме автоматизации предусматривается автоматическое регулирование теплопроизводительности воздухоподогревательных установок изменением температуры подаваемого теплоносителя при постоянном

расходе воздуха и теплоносителя через них путем подмешивания части теплоносителя из обратной линии в подающую.

Упрощенная функциональная схема системы управления группой приточных вентиляционных камер представлена на рис. 13.2. В этой схеме группа воздухоподогревательных установок приточных камер *ПК1-ПК$_П$*, соединенных параллельно по теплоносителю, связана с узлом подготовки теплоносителя, состоящим из насосов *Н1* и *Н2* (один резервный), обратного клапана *К1*, регулирующего клапана *К2* и регулятора давления *РД*. На обратном трубопроводе перед узлом подготовки установлено реле протока теплоносителя *РПТ*.

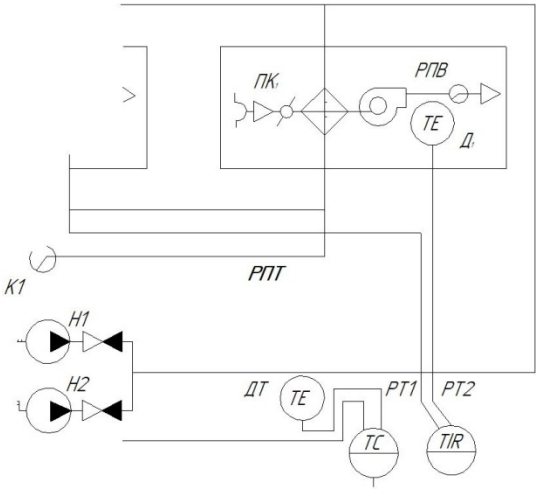



Рис. 13.2. Функциональная схема управления группой приточных камер

Исполнительный механизм клапана *К2* электрически связан с регулятором *РТ1*, на входы которого подсоединены датчики *ДТ* температуры теплоносителя в подающей линии на выходе из узла подготовки и датчик *Д$_{нв}$* температуры наружного воздуха. На схеме представлены также элементы сигнальной аппаратуры: сигнализатор температуры приточного воздуха *РТ2* с датчиками *Д*, *Д$_п$* и реле протока воздуха РПВ, установленные в каждой приточной камере. Сигнализатор *РТ2* конструктивно выполнен в виде регулирующего многоточечного моста КСМ, выходные контакты которого, как и контакты РПВ, замыкают цепи световой и звуковой сигнализации.

Разработанная система обеспечивает управление группой приточных камер в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме управления система позволяет запустить и остановить двигатель вентилятора любой приточной камеры *ПК1-ПК$_П$*, запустить в соответствующем направлении и остановить исполнительный механизм регулирующего клапана *К2*; запустить в соответствующем направлении и остановить исполнительные механизмы любого воздушного клапана. В режиме автоматического управления система позволяет осуществить программный запуск и выключение приточных камер *ПК1-ПК$_П$*, автоматическое поддержание заданной температуры воздуха на выходе из приточных камер; контроль температуры теплоносителя на выходе из калорифера, температуры и скорости воздуха на выходе из приточных камер с сигнализацией аварийного режима.

Включение системы и выбор режима «Ручной – Автомат» производится с дистанционного щита. В режиме ручного управления при переводе переключателя выбора насоса в положение «О» управление двигателями насосов производится установленными по месту кнопками «Пуск» и «Остановка». Там же установлены кнопки ручного управления электродвигателями вентиляторов, исполнительных механизмов клапана *К2* и воздушных клапанов. В режиме автоматического управления при переводе переключателей режима работы в положение «Автомат» и выбора насоса в положения *1* и *2* кнопкой, расположенной на дистанционном щите, производится программный запуск группы приточных камер. Одновременно зажигается сигнальная лампа, свидетельствующая о включении автоматического управления. Вначале включается выбранный циркуляционный насос и открывается регулирующий клапан *К2*. После 5-минутного прогрева калориферов автоматически включаются электродвигатели вентиляторов и открываются воздушные приемные клапаны. После их полного открытия срабатывают концевые микропереключатели, подключая к работе цепи сигнализации и контроля приточных камер. При отсутствии или понижении расхода теплоносителя срабатывает реле РПТ и обесточивает промежуточное реле, которое, в свою очередь, размыкает контакты для питания магнитных пускателей электродвигателей вентиляторов.

Выключение системы автоматического управления производится также с дистанционного щита. При этом обесточиваются магнитные пускатели насоса и электродвигателей вентиляторов, закрываются воздушные приемные клапаны и клапан *К2* на теплоносителе.

## 13.3. Автоматизация вытяжных систем вентиляции

В первом разделе настоящей главы рассмотрена схема автоматического регулирования приточной системы вентиляции, обеспечивающая изменение подачи вентилятора при температуре наружного воздуха ниже расчетной. Одновременно с изменением подачи приточного вентилятора должна изменяться и подача вытяжного вентилятора.

При автоматизации вытяжной системы (рис. 13.3) подача вытяжного вентилятора изменяется с помощью направляющего аппарата *3* приточного вентилятора. Синхронно, на такой же угол, с помощью балансного реле *1* поворачивается исполнительный механизм 6 направляющего аппарата *5* вытяжного вентилятора.

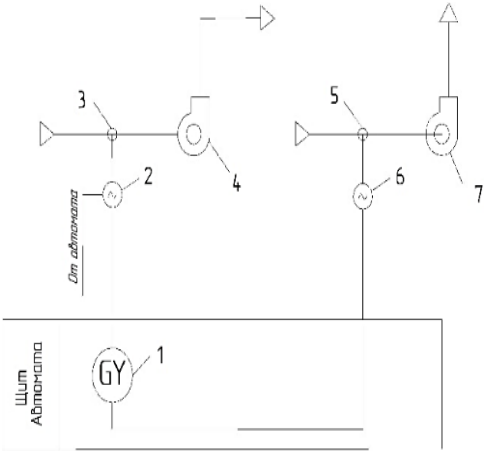



Рис. 13.3. Функциональная схема автоматизации вытяжной системы с переменной производительностью: *1* – реле; *2, 6* – исполнительные механизмы; *3, 5* – направляющие аппараты; *4* – приточный вентилятор; *7* – вытяжной вентилятор

При вентиляции помещений особо опасных производств не допускается даже временного отключения вытяжного вентилятора, всегда предусматривается резервная вентиляционная установка. Схема автоматического включения аварийного вытяжного вентилятора приведена на рис. 13.4. Сущность работы этой схемы состоит в следующем. При включении электродвигателя вентилятора *7* открывается сблоки-

рованный с ним привод клапана *6*, срабатывает реле *3* потока воздуха и загорается сигнальная лампа *4*. При аварийном выходе из строя вентилятора *7* движение воздуха прекращается, срабатывает реле *3*, выключается магнитный пускатель *5*, закрывается створчатый клапан *6* и гаснет сигнальная лампа *4*. Одновременно с помощью реле *3* потока воздуха в работу включается вентилятор *9*, открывается створчатый клапан *8*, срабатывает реле потока *1* и загорается сигнальная лампа *2*.

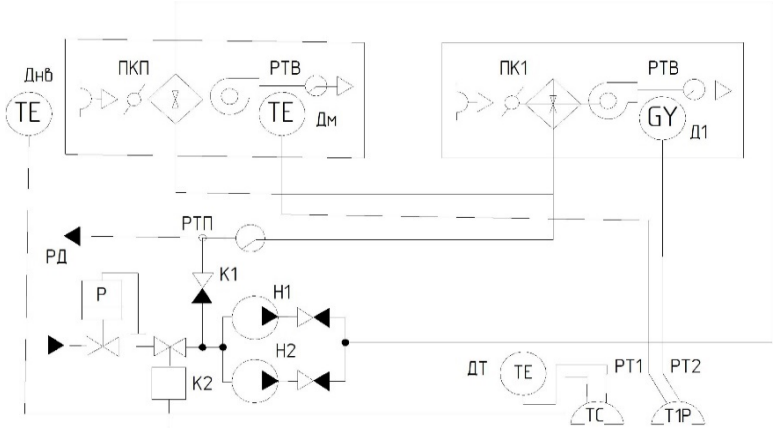



Рис. 13.4. Функциональная схема автоматизации вытяжной системы с резервным вентилятором

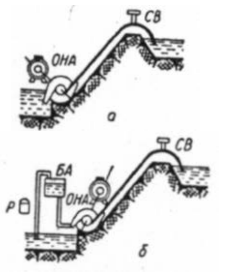
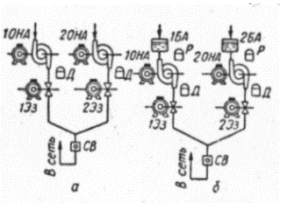
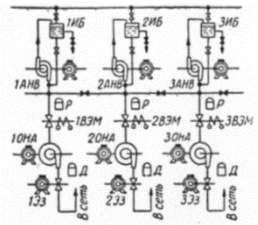
При автоматизации вытяжных систем большое значение имеет дистанционное управление, которое особенно эффективно при множестве вентиляционных систем и значительной удаленности их друг от друга. В этом случае все управление и сигнализация выводятся на диспетчерский щит, что позволяет сократить затраты труда на обслуживание вентиляционных систем, а также контролировать их работу.

# 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

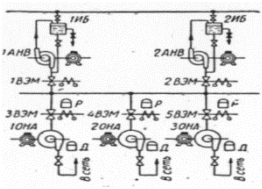
## 14.1. Схемы управления насосными агрегатами

Большинство схем автоматического управления насосными агрегатами в зависимости от степени их сложности и количества применяемой аппаратуры может быть разделено на четыре группы (табл. 14.1).

Таблица 14.1. **Схемы управления в зависимости от типа насосной станции и гидротехнических схем насосных агрегатов**

| Группа сложности | Тип насосной станции | Принципиальная схема | Состав оборудования |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1-я | а) камерный с индивидуальным трубопроводом для каждого агрегата; б) водопроводный с баком-аккумулятором на всасывающем трубопроводе для каждого агрегата |  | Насосный агрегат без вспомогательного оборудования |
| 2-я | а) камерный с объединенным напорным трубопроводом для нескольких насосных станций; б) водопроводный с баком аккумулятором и объединенным напорным трубопроводом |  | Насосный агрегат с индивидуальной электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе |
| 3-я | Водопроводный независимо от количества напорных трубопроводов |  | Насосный агрегат с индивидуальными вакуум-насосом и электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе |

Окончание табл. 14.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 4-я | Водопроводный независимо от количества напорных трубопроводов |  | Насосный агрегат с индивидуальной электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе и общая вакуум-установка (два вакуум-насоса: рабочий и резервный) |

Каждая группа схем управления выполняет идентичные операции, обусловливаемые типом насосной станции и гидромеханическими схемами насосных агрегатов.

Первая, наиболее простая группа схем применяется для насосных агрегатов, состоящих из основного насоса с электродвигателем, ОНА и не имеющих в своем составе управляемых электрифицированных задвижек ЭЗ и вакуум-насосной установки АНВ.

Управление таким агрегатом, по существу, сводится к управлению двигателем основного насоса. Вспомогательные устройства и технологические реле также сводятся к минимуму. Благодаря этому схема автоматического управления получается весьма простой: она требует для своего выполнения минимального количества аппаратуры и обеспечивает высокую надежность работы агрегата.

Схемы первой группы непосредственно применяются для гидромеханических установок с осевыми насосами. Работа горизонтальных центробежных насосов по этой схеме, т.е. без использования вакуум-насосов и управляемых задвижек, возможна лишь при специальных конструктивных решениях насосной станции, применении специальных способов заливки насосов и использовании индивидуальных напорных трубопроводов.

Специфические особенности приобретают режимы пуска и остановки.

Рассмотрим основные гидромеханические схемы таких насосных станций и требования, предъявляемые ими к схемам автоматического управления.

В мелиоративных насосных станциях с центробежными насосами без управляемых задвижек необходимость в вакуум-насосах исключается различными способами:

– установкой насосов в заглубленных камерах с отрицательной высотой всасывания;

– применением баков-аккумуляторов БА;

– использованием приподнятой всасывающей трубы и пр.

Корпус насоса при этих способах заливки постоянно заполнен водой, что облегчает пуск и сокращает его продолжительность.

## 14.2. Заливка насосов водой

1. **Установка насосов в заглубленных камерах.** Оси насосов устанавливаются ниже минимального уровня водозабора; при этом они всегда находятся под заливом (камерный тип станции).

Создание таких станций обычно связано с увеличением объема строительных работ и требует их высокого качества, особенно гидроизоляции.

Для ряда конкретных насосных станций, несмотря на некоторое увеличение объема строительных работ, применение установок с заглубленными камерами дает существенный технико-экономический эффект, а именно:

а) устраняются явления срыва вакуума при пуске насосов; повышается надежность работы вследствие устранения кавитации;

б) отпадает необходимость в установке обратного клапана во всасывающей линии насосов, благодаря чему упрощается ее конфигурация и снижаются гидравлические потери;

в) повышается надежность работы сальниковых уплотнений за счет создания в них избыточного давления вместо вакуума;

г) отрицательная высота всасывания позволяет применять насосы с малой высотой всасывания и высоким к. п. д., благодаря чему повышается производительность насосов и снижается расход электроэнергии по сравнению с аналогичными условиями при положительной высоте всасывания;

д) упрощается схема автоматического управления и существенно уменьшается общее количество аппаратуры управления; в частности, исключаются приборы контроля заливки насосов.

2. **Заливка горизонтальных центробежных насосов при помощи баков-аккумуляторов.** Для насосов небольшой производительности некоторое применение находят специальные баки-аккумуляторы.

Бак-аккумулятор представляет собой герметический закрытый сосуд с двумя патрубками, из которых нижний соединяется с всасывающими патрубками насоса, а верхний – с всасывающим трубопроводом.

При включении электродвигателя насос начинает подавать воду в нагнетательный трубопровод из бака-аккумулятора, в котором соответственно понижается уровень и создается необходимое разрежение для подсоса воды в бак-аккумулятор из приемного бассейна по всасывающей трубе.

Размеры бака-аккумулятора должны быть такими, чтобы объем между нижней отметкой верхнего патрубка и верхней отметкой нижнего патрубка в 3–3,5 раза превышал объем всасывающего трубопровода.

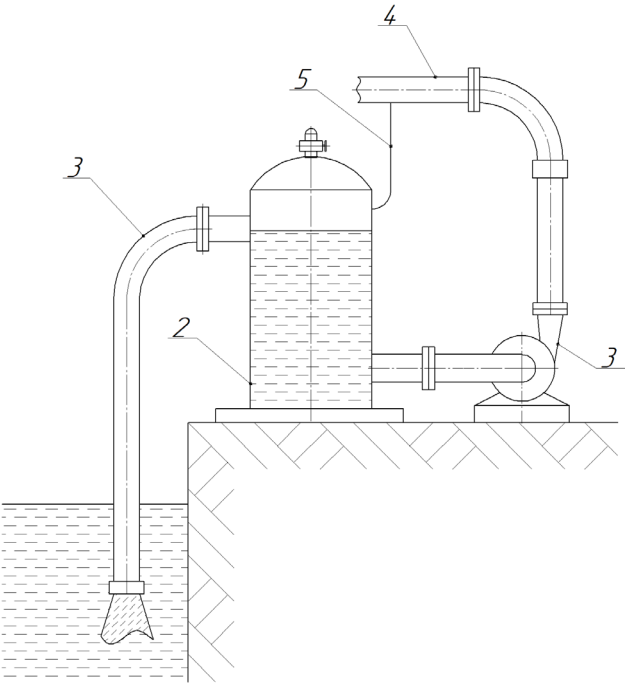



Рис. 14.1. Схема заливки насоса при помощи бака аккумулятора:
*1* – всасывающий трубопровод; *2* – бак-аккумулятор; *3* – насос; *4* – напорный трубопровод; *5* – трубка для срыва вакуума

Конструкция бака-аккумулятора должна быть рассчитана на работу в условиях вакуума и должна обеспечивать герметичность, при которой исключается подсос воздуха через трубные соединения и сальниковые уплотнения.

К недостаткам этого способа заливки относится возможность опорожнения бака при остановке насоса вследствие повышенного давления в верхней части бака. Для устранения этого явления принимаются специальные меры.

В частности, для этой цели служит показанная на рис. 14.1 уравнительная трубка, назначение которой – удалять воздух повышенного давления из верхней части бака. Гидромеханические схемы с использованием бака-аккумулятора, по конструктивным и экономическим соображениям, рекомендуется применять для центробежных насосов сравнительно небольшой производительности (расход до 40–50 л/с, насосы 6К-8, 6К-12 и т. д.). При больших расходах размеры баков становятся чрезмерно громоздкими.

3. **Заливка горизонтальных центробежных насосов при помощи приподнятой всасывающей трубы.** Как показано на рис. 14.2, всасывающая труба устраивается с приподнятым коленом, что позволяет первоначально залить водой внутреннюю полость насоса и прилегающие части всасывающего и напорного трубопроводов до уровня нижней кромки приподнятого колена.

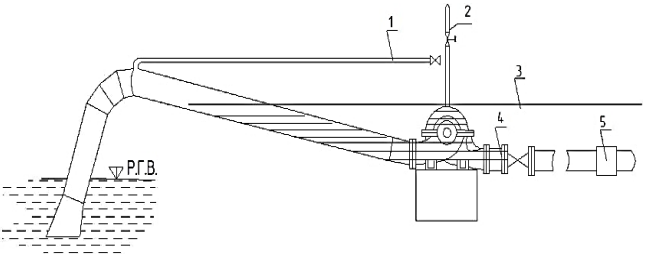



Рис. 14.2. Схема приподнятой всасывающей трубы и воздухоотводящей трубки: *1* – воздухоотводящая трубка; *2* – вентиль для первоначальной заливки насоса и всасывающей трубы и для выпуска воздуха; *3* – нижняя кромка приподнятого колена и верх корпуса насоса; *4* – задвижка; *5* – обратный клапан; *Р.Г.В.* – расчетный горизонт воды

При пуске насоса имевшийся объем воды из всасывающей трубы перекачивается в напорный трубопровод, благодаря чему во всасывающей трубе создается разрежение

Вследствие разности атмосферного и создавшегося во всасывающей трубе пониженного давлений вода из водозаборной камеры поступает во всасывающую трубу и насос. При дальнейшей работе насоса вакуум во всасывающей трубе возрастает, эта труба полностью за-

полняется водой и начинается нормальная работа.

После остановки насоса во всасывающей трубе вода должна оставаться на уровне нижней кромки приподнятого колена, и каждый последующий пуск будет происходить без дополнительной заливки.

Однако при остановках насоса без задвижки и обратного клапана начинается сифонное действие всасывающей трубы, и в трубе остается мало воды.

Чтобы исключить образование сифона, остановку насосного агрегата следует сочетать с одновременным автоматическим срывом вакуума во всасывающей трубе. Следовательно, схема управления должна в этом случае обеспечивать срабатывание клапана срыва вакуума.

Пуск горизонтальных центробежных насосов с приподнятой всасывающей трубой рекомендуется для насосов с геометрической высотой всасывания не более 2–3 м.

Применение эжекторного устройства позволяет значительно сократить длину приподнятой всасывающей трубы (рис. 14.3). При этом обеспечивается пуск насоса практически при любой геометрической высоте всасывания.

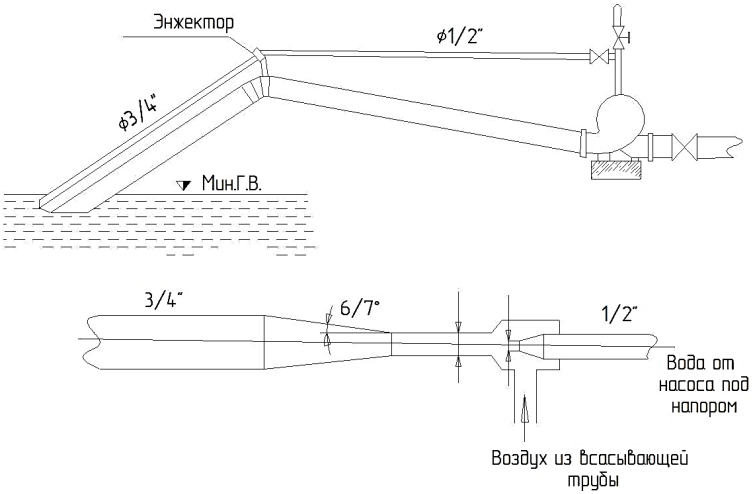



Рис. 14.3. Вариант приподнятой всасывающей трубы в комбинации с эжектирующим устройством: *а* – общий вид; *б* – схема эжектора

Воздушная труба присоединяется одним концом к колену всасывающей трубы, а другим – к корпусу насоса, куда вводится эжекторное

сопло, соединенное с нагнетательной полостью насоса при помощи напорной трубки.

Разрежение во всасывающей трубе при пуске насоса создается как действием эжектора, так и вследствие удаления из всасывающей трубы имевшейся в ней воды.

Воздушная смесь из эжектора может сбрасываться по сбросной трубке в водозаборную камеру или в напорный трубопровод за задвижкой. Сбросная трубка может быть использована и для срыва вакуума во всасывающей трубе после остановки насоса. Применение приподнятой всасывающей трубы в комбинации с эжектирующим устройством уже невозможно без задвижки или, в крайнем случае, без обратного клапана в напорном трубопроводе.

## 14.3. Автоматический пуск и остановка центробежных насосов

Запускать и останавливать центробежные насосы с открытой задвижкой на напорном трубопроводе начали сравнительно недавно. Благодаря ряду преимуществ этот способ находит широкое применение в мелиоративных системах, установках горнорудного водоотлива, водоснабжения и на электростанциях.

В литературе описана эксплуатация насосов с открытой задвижкой производительностью 1500–2000 м$^3$/ч с электроприводом от асинхронного двигателя мощностью 1000–1200 кВт. В большинстве случаев имеется в виду работа при наличии в напорном трубопроводе обратного клапана. Однако насос с постоянно открытой задвижкой может работать и без обратного клапана. Условия пуска и остановки в этом случае принципиально меняются, и пуск не всегда возможен.

Для мелиоративных систем последний режим – пуск и остановка без задвижек и обратных клапанов – представляет большой интерес. Однако выбору этой системы должен предшествовать анализ возможностей и условий его применения. Качественный процесс пуска насоса с открытой задвижкой при отсутствии обратного клапана может быть показан на кривой *Q–H*, на которой нанесены зависимости производительности насоса, потребляемой им мощности и коэффициента полезного действия от напора при постоянных оборотах (рис. 14.4).

При подборе насоса полная высота подъема воды определяется по формуле:

$$H_п = H_г + Lh, \qquad (14.1)$$

где $H_п$ – полная высота подъема воды;

$H_г$ – общая геометрическая высота подъема, равная сумме геометрических высот всасывания и нагнетания;

$\sum h = SQ^2$ – сумма всех гидравлических потерь в трубопроводах;

$S$ – сопротивления в трубопроводах заданных длин и диаметров;

$Q$ – производительность насоса;

$L$ – длина трубопровода.

На рис. 14.4 прямая $СД$ проведена параллельно оси $Q$ на расстоянии $H_г$, равном геометрической высоте подъема. Параболическая кривая $CE$ является кривой потерь в трубопроводе (характеристика трубопровода). Она пересекает рабочую характеристику в точке $A$, называемой предельной рабочей точкой насоса, работающего в данных конкретных условиях. Точкой $A$ определяются параметры рабочей точки насоса $Q_A$, $N_A$ и $\eta_A$ при установившемся режиме.

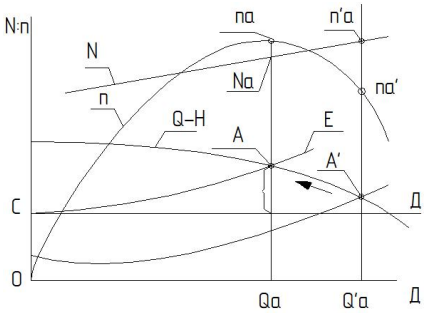



Рис. 14.4. Характеристика ($Q$–$H$) насоса в рабочем и неустановившемся режимах (пуск с открытой задвижкой напорного трубопровода)

При подборе насоса стремятся к тому, чтобы:

– заданный режим работы лежал в области наивыгоднейшего значения к. п. д. насоса ($\eta_A$);

– высота всасывания насоса не превышала предела, установленного для данной конструкции.

После пуска насоса особенно большой производительности при открытой задвижке и незаполненном водой трубопроводе происходит постепенное заполнение водой нагнетательного трубопровода и возрастание геодезической высоты всасывания.

Разгон насосного агрегата до номинальных оборотов и главным образом его работа в неустановившемся режиме характеризуются кривой $QA'A$. Кривая $CE$ как бы перемещается по характеристике $Q-H$ от точки $A'$ периода разгона и начала заполнения трубопровода к точке $A$ установившейся нормальной работы.

В точке $A'$ производительность насоса $Q'_A$ значительно превышает нормальную.

Работа насоса происходит в правой неустойчивой зоне характеристики $Q$–$H$. Насос здесь имеет наименьшую всасывающую способ-

ность и до определенного наполнения трубопровода может кавитировать. Начиная от точки $A'$, как это следует из кривой $N$, электродвигатель будет работать с перегрузкой. Время такой работы определяется временем работы агрегата на участке $A'A$, т. е. зависит от характеристики насоса, конфигурации и размеров напорного трубопровода. Этот период можно установить с помощью расчета.

Очевидно, что работа насосного агрегата с открытой задвижкой допускается лишь при условии, что перегрузка электродвигателя и ее продолжительность лежат в допустимых пределах. Кроме того, эта временная перегрузка должна быть учтена при построении токовой защиты схемы автоматического управления насосным агрегатом.

В мелиоративных системах большинство насосных станций работает в открытую сеть. Поэтому при отсутствии задвижек и обратных клапанов в напорных трубопроводах особое внимание следует уделять недопущению слива воды через отключенный агрегат из общего водоприемного устройства напорного бассейна, являющегося головной частью отводящего канала. Этот процесс должен быть автоматизирован. Для этого в конце трубопровода предусматривают хлопушки, быстропадающие щиты, полигональные водосливы и сифонные водовыпуски с различными устройствами для срыва вакуума в сифоне.

В настоящее время применяются преимущественно сифонные водовыпуски, считающиеся более надежными и экономичными. На рис. 14.5 в качестве иллюстрации приведены два типа устройств, применяемых для автоматического срыва вакуума в сифоне при обратном токе воды в трубопроводе.

Гидравлический затвор (рис. 14.5) состоит из трубки *8* и вертикального стакана *9*. Трубка сечением, равным приблизительно 1,5 % живого сечения горловины сифона, вваривается открытым концом в сифон. Второй конец трубки помещают в металлический стакан диаметром, большим диаметра трубки на 100 мм. Стакан, соединенный трубкой с полостью сифона, заполняется водой одновременно с наполнением канала.

При прохождении воды через сифон уровень ее в стакане устанавливается выше нижней грани трубки на величину скоростного напора, которая может быть доведена до 50–60 см при скорости движения воды порядка 3–3,5 м/с.

При прекращении тока воды в сифоне или ее движении в обратную сторону уровень воды в стакане падает, обнажая нижний конец трубки. Воздух входит в полость сифона, вакуум срывается и движение воды из отводящего канала в трубопровод прекращается.

Конструкция клапана срыва вакуума (рис. 14.5, *б*) имеет рычаг с лопаткой *1*, опущенной в трубопровод. При прямом потоке под давлением воды на лопатку, входные отверстия перекрываются тарельчатыми клапанами *5*.

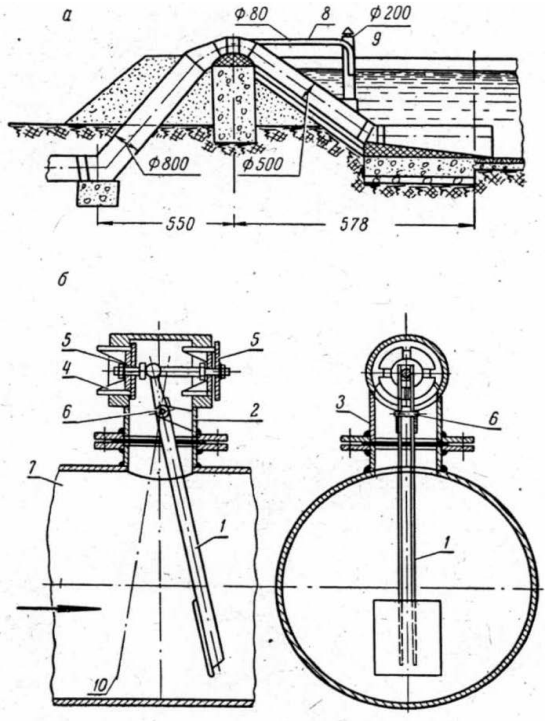



Рис. 14.5. Устройства для срыва вакуума в сифоне: *а* – гидравлический клапан; *б* – клапан; *1* – рычаг с лопаткой; *2* – корпус; *3* – горловина; *4* – сухарь; *5* – клапаны; *6* – ось вращения рычага с лопаткой; *7* – напорный трубопровод; *8* – трубка; *9* – металлический стакан; *10* – положение лопатки при обратном токе воды

При отключении насоса и изменении направления потока вода давит на лопатку в обратную сторону, тарельчатые клапаны открывают входные отверстия и впускают воздух, прекращая поступление воды в трубопровод. Этот клапан имеет подвижные механические детали и менее надежен в эксплуатации.

Для клапана срыва вакуума применяется грузовой или пружинный

привод масляного выключателя. При отключении работающего насосного агрегата или исчезания напряжения привод срабатывает и клапан срывает вакуум.

Каждая конструкция клапана срыва вакуума имеет свою область применения и выбирается при разработке гидромеханической схемы.

В схемах автоматического управления насосными агрегатами работа клапана срыва вакуума должна отражаться сигнализацией его состояния и блокировкой, не допускающей включения насосного агрегата при неисправности клапана.

При любой остановке насосного агрегата вся вода из напорного трубопровода будет сливаться в нижний бьеф через насос, который в этом случае работает в турбинном режиме. Поэтому реверс агрегата должен быть предварительно согласован с заводом – поставщиком оборудования.

Как правило, насосные агрегаты могут допускать возможность кратковременного (в пределах часа) обратного вращения с разгонным числом оборотов $n_р$ = 1,2 – 1,3 $n_н$, где $n_н$ – номинальное число оборотов.

Как время работы в реверсивном режиме, так и $n_р$ обусловливаются параметрами напорного трубопровода. Нередко при очень длинных трубопроводах и большой высоте подачи воды допустимые параметры работы агрегата в реверсивном режиме не выдерживаются, и в этом случае эксплуатация такого агрегата недопустима.

Нельзя также повторно запускать выключенный агрегат во время его работы в турбинном режиме. Такой пуск может вызвать аварийное отключение электродвигателя вследствие его перегрузки, а также механические повреждения агрегата. Поэтому в схемах автоматического управления 1-й группы должны предусматриваться либо блокировка, предотвращающая возможность такого пуска, либо, в крайнем случае, сигнализация, предупреждающая персонал об опасности такого пуска.

Датчиком для блокировки или сигнала может быть струйное реле, реле обратного вращения и т. п.

## 14.4. Управление насосным агрегатом с электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе

2-я группа схем предназначается для управления насосными агрегатами, имеющими индивидуальные электрифицированные задвижки на напорных трубопроводах. В связи с этим данная группа схем более сложна.

Пуск насосного агрегата происходит при закрытой напорной задвижке. Она начинает открываться после окончания разгона двигателя и установления соответствующего давления. Такой способ создает условия для плавного и спокойного нарастания мощности в период пуска.

Допускается также пуск при одновременном включении двигателя насоса и напорной задвижки. Этот способ, по существу, мало отличается от первого, так как обычно время пуска двигателя значительно меньше времени, необходимого для открытия задвижки, и к моменту окончания разгона насоса задвижка открывается на очень малую величину, которая незначительно изменяет характер пуска с полностью закрытой задвижкой. Однако при последовательном пуске насоса и задвижки схема автоматики получается более четкой. Задвижка должна закрываться перед отключением основного насоса и после аварийного отключения электродвигателя.

Обычно применяются электрифицированные задвижки с реверсивным асинхронным короткозамкнутым двигателем. Основной недостаток такого привода на переменном токе в насосных станциях, работающих без обслуживающего персонала, заключается в том, что при аварийном исчезновении напряжения на шинах насосных станций задвижка не закроется и, следовательно, не будет предотвращен реверс агрегата и обратный ток воды.

Таким образом, возможность реверса насосного агрегата при аварийном исчезновении напряжения должна быть предусмотрена для всех рассматриваемых гидромеханических схем: как без задвижки, так и с электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе. В отдельных случаях для предотвращения реверса на напорных трубопроводах устанавливают обратные клапаны, электрифицированные задвижки с независимым источником питания или задвижки с гидравлическим приводом.

## 14.5. Управление насосным агрегатом с вакуум-насосом и электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе

3-я и 4-я группы схем обеспечивают автоматизацию агрегата с центробежным насосом, ось которого расположена выше горизонта воды в водоисточнике. Пуск этого агрегата может быть осуществлен лишь с предварительным заливом его водой при закрытой задвижке на напорном трубопроводе, а схема управления агрегата должна в этом случае обеспечить взаимодействие ряда вспомогательных механизмов и аппаратуры.

Помимо управления электроприводами основного насоса и электрифицированной задвижки, возникает необходимость в предварительном заливе насоса водой. Эту операцию на автоматизированных мелиоративных насосных станциях выполняют преимущественно с помощью водокольцевых вакуум-насосов типа КВ.

На рис. 14.6 приведена схема соединения вакуум-установки *2* с основным насосом *1*. Требуемая для нормальной работы вакуум-насоса постоянная циркуляция воды обеспечивается при помощи бачка *3*, из которого вода поступает во всасывающий трубопровод *5* и вместе с воздухом попадает в корпус насоса. Затем, по мере вращения рабочего колеса, воздух и излишняя вода через нагнетательный трубопровод *6* выбрасываются обратно в бачок.

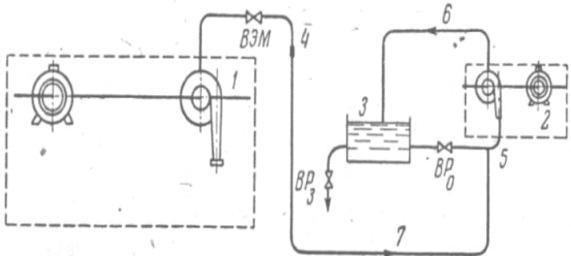



Рис. 14.6. Гидромеханическая схема соединения вакуум-установки с основным насосом: $ВР_0$ – ручной вентиль открытый; $ВР_з$ – ручной вентиль закрытый; *ВЭМ* – электромагнитный вентиль; *1* – насос; *2* – вакуум-установка; *3* – бачок; *4* – устройство для контроля уровня или тока воды; *5* – всасывающий трубопровод; *6* – нагнетательный трубопровод; *7* – слив

Автоматизация этого процесса требует наличия устройства *4*, контролирующего уровень или проток воды (для фиксации окончания процесса залива насоса), а также дистанционно управляемого запорного вентиля для разобщения трубопровода, соединяющего вакуум-насос с центробежным (чтобы вода из камеры насоса не поступала в вакуум-насос и бачок). Приводом вакуум-насоса обычно служит асинхронный короткозамкнутый двигатель мощностью 1,5 или 2,2 кВт соответственно для насосов марок КВН-4 и КВН-8.

Приведенный процесс залива насоса водой относится к насосной станции с одним агрегатом. Автоматизация процесса залива нескольких агрегатов может быть построена по принципу, при котором каж-

дый насосный агрегат снабжается индивидуальным вакуум-насосом. Можно также, учитывая однотипность процесса залива всех насосов станции, устанавливать два вакуум-насоса для обслуживания всех агрегатов.

Схема залива насосов с индивидуальными вакуум-насосами позволяет построить всю автоматизацию по принципу, при котором каждый насосный агрегат имеет независимый от других полный комплект вспомогательных механизмов и аппаратуры, электросиловые цепи и цепи управления. При этой схеме выход из строя одного из агрегатов не влияет на работу других.

Вторая схема залива предусматривает общую вакуум-установку для насосной станции в целом. В этом случае выход из строя вакуум-установки выводит из строя всю станцию. Преимуществом первой схемы по сравнению со второй является также отсутствие дистанционно управляемых вентилей в гидромеханической системе и более короткие всасывающий и нагнетательный трубопроводы вакуум-установки. Однако при первой схеме для каждого агрегата, если их больше двух, требуется дополнительный вакуум-насос с электродвигателем и пусковой аппаратурой.

Учитывая технические преимущества и недостатки приведенных вариантов залива насоса, для насосных станций с количеством агрегатов до 3–4 целесообразно принять индивидуальные вакуум-насосы (3-я группа схем). На насосных станциях, где имеется более четырех агрегатов, должна применяться схема 4-й группы как более экономичная.

## 14.6. Автоматическое, полуавтоматическое и программное управление насосными станциями

В зависимости от степени автоматизации насосных станций, обусловленной их назначением и режимом эксплуатации, они подразделяются на автоматические, полуавтоматические и станции с программным управлением.

Работа автоматических насосных станций протекает без участия обслуживающего персонала. Команды на включение и отключение насосных агрегатов подаются датчиками, обеспечивающими заданный режим работы.

К категории автоматических относятся главным образом осушительные, перекачечные и водопроводные насосные станции, а также дренажные насосы любого назначения. Управление ими осуществля-

ется датчиками уровня воды, давления, расхода и т. д.

В полуавтоматических насосных станциях каждый насосный агрегат управляется независимо от других, от единичной команды, подаваемой персоналом. После подачи первоначальной команды агрегат работает автоматически, обеспечивая определенную последовательность работы отдельных механизмов, входящих в состав агрегата, а также его автоматическую защиту от неисправностей и аварий.

К этой категории обычно относятся оросительные насосные станции, где включение и отключение агрегатов осуществляются дежурным персоналом в соответствии с графиком водопотребления.

Помимо автоматического и полуавтоматического, может быть также применено программное управление оросительными насосными станциями. В этом случае единичная команда управления (программа) подается для всей станции в целом, после чего ее выполнение и последующая работа станции протекают автоматически.

При программном управлении (в отличие от полуавтоматического) обслуживающий персонал не управляет отдельными агрегатами и непосредственно не контролирует работу каждого из них. Такие операции, например, как замена аварийного отключенного агрегата резервным и запуск двигателей после кратковременной пропажи и последующего появления напряжения, также осуществляются автоматически.

В целом ряде случаев (и особенно при телемеханическом управлении большим количеством небольших насосных станций с одного диспетчерского пункта) программное управление имеет существенные преимущества по сравнению с полуавтоматическим, так как в этом случае потребная емкость системы телемеханики минимальна, увеличивается надежность и простота управления.

При выборе степени автоматизации насосных станций учитывают также технологический режим и общий состав оборудования станции в целом. На оросительных насосных станциях насосные агрегаты работают непрерывно, круглосуточно по графику, увязанному со сроками полива. График водопотребления покрывается включением различного числа насосных агрегатов. Обычно оптимальное число основных агрегатов на насосных станциях равно четырем, минимальное – двум, а максимальное – восьми. Учитывая возможное объединение напорных трубопроводов, стремятся к тому, чтобы число агрегатов было кратным двум или трем.

Производительность насосного агрегата в процессе его работы обычно не регулируется; изменение производительности путем дрос-

селирования задвижкой напорного трубопровода экономически невыгодно и практикуется чрезвычайно редко.

Число установленных агрегатов рассчитывается на подачу форсированного расхода в пределах 10–30 %. Установка специального резервного агрегата по нормам не требуется, за исключением того случая, когда все агрегаты насосной станции, согласно графику водоподачи, должны работать непрерывно в течение одного месяца, а оросительная система при этом не допускает поочередного 1–3-дневного перерыва в работе для профилактического осмотра и ремонта.

Однако, так как выбор агрегатов осуществляется с учетом подачи форсированного расхода, один агрегат большую часть времени находится в резерве, и на станциях автоматического и программного управления следует предусматривать автоматический ввод резерва.

На осушительных насосных станциях рекомендуется устанавливать не менее трех агрегатов суммарной производительностью, равной максимальной ординате укомплектованного графика стока. Условия резервирования, неавтоматический ввод резерва решаются аналогично оросительным станциям.

В настоящее время, в связи со строительством насосных станций с агрегатами большой производительности и высокого напора при условии подачи воды в бетонированные каналы и лотки, аккумулирующая емкость которых мала, становится экономически выгодным устанавливать 1–2 насосных агрегата с регулируемой производительностью. При отсутствии такого регулирования неизбежны значительные сбросы дорогостоящей воды, поднятой на большую высоту.

## 14.7. Регулирование подачи центробежных насосов

Корпус центробежного насоса выполняют в виде спиральной литой конструкции, внутри которой находится рабочее колесо, насаженное на вал. Корпус имеет два патрубка: всасывающий, по которому вода поступает к рабочему колесу, и нагнетательный для вывода ее из насоса под напором. Диаметр всасывающего патрубка обычно больше, чем нагнетательного. Перед пуском всасывающую трубу и корпус заполняют водой.

Напор, развиваемый центробежным насосом, зависит от диаметра $D$ рабочего колеса, частоты его вращения, очертания и числа лопаток. Для большинства центробежных насосов напор, создаваемый рабочим колесом диаметром $D$ с числом оборотов в минуту $n$ или частотой вращения $\omega$, можно определить по выражению:

$$H = \alpha \frac{\pi^2 D^2 n^2}{60^2 g} = \alpha \frac{\omega^2 R^2}{g} = \alpha \frac{\upsilon^2}{g}, \qquad (14.2)$$

где $H$ – напор, развиваемый насосом, м;

$\upsilon$ – окружная скорость на внешней окружности рабочего колеса, м/с;

$\alpha$ – коэффициент снижения напора из-за возникновения гидравлических сопротивлений с учетом конечного числа лопастей рабочего колеса. Для насосов со спиральным отводом $\alpha$ = 0,35–0,5, с направляющим аппаратом $\alpha$ = 0,45–0,55;

$n$ – скорость вращения рабочего колеса, мин$^{-1}$;

$\omega$ – частота вращения рабочего колеса, рад/с$^{-1}$;

$R$ – радиус рабочего колеса, м;

$g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$.

Подача центробежного насоса зависит от тех же факторов, а также от поперечных размеров каналов рабочего колеса. Напор и подача воды центробежным насосом зависят от конструкции (качество гидравлического уплотнения между нагнетательной и всасывающей областью насоса), которую точно и для каждой марки определяет завод-изготовитель. Характеристики центробежных насосов строят по опытным данным.

Напор, подачу, допускаемую вакуумметрическую высоту всасывания, КПД и мощность насоса находят по их характеристикам. Все перечисленные параметры взаимосвязаны. Так, с увеличением высоты нагнетания подача центробежного насоса уменьшается, изменяются высота всасывания, КПД и мощность. На рис. 14.7 приведена каталожная характеристика насоса. Центробежные насосы различают по числу ступеней, способу подвода и отвода воды от рабочего колеса, расположению вала.

По числу ступеней насосы подразделяются на одноступенчатые (одно рабочее колесо) и многоступенчатые (несколько последовательно расположенных рабочих колес на одном валу). Вода в многоступенчатом насосе проходит последовательно через все рабочие колеса, каждое из которых увеличивает напор на определенную величину. Если не удается подобрать центробежный насос с характеристикой, отвечающей заданным напору и расходу, применяют различные способы регулирования.

При значительных превышениях напора уменьшение его дросселированием невыгодно, так как связано с непроизводительными затрата-

ми энергии. Рациональный способ регулирования центробежных насосов – преобразование характеристик за счет изменения частоты, вращения или диаметра рабочего колеса (обточка).

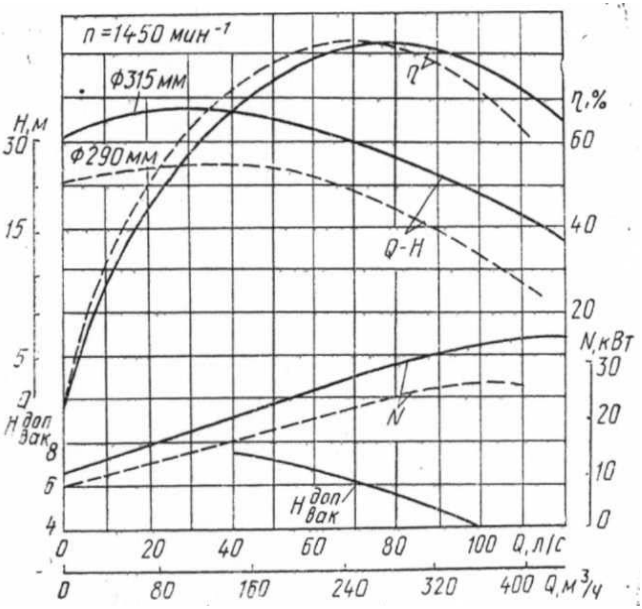



Рис. 14.7. Характеристика центробежного насоса

Если частота вращения рабочего колеса центробежного насоса увеличивается или уменьшается, то соответственно снижаются или возрастают подача, напор и мощность. Зависимость этих величин от частоты вращения можно выразить уравнением динамического подобия центробежного насоса:

$$\frac{Q_1}{Q} = \sqrt{\frac{H_1}{H}} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N}} = \frac{n_1}{n} = \frac{\omega_1}{\omega}, \qquad (14.3)$$

где $Q$, $H$, $N$ – расход, напор и мощность насоса, м$^3$/с, м, кВт, при номинальной частоте вращения $n$ мин$^{-1}$ или ω рад/с;

$Q_1$, $H_1$, $N_1$ – те же величины при измененной частоте вращения.

КПД насоса при изменении частоты вращения практически не изменяется.

Уменьшать частоту вращения более чем в два раза не рекомендуется. Увеличивать ее можно только по согласованию с заводом-изготовителем, обычно не более чем на 10–20 % выше номинальной. При уменьшении частоты вращения центробежного насоса допустимая высота всасывания несколько возрастает, при увеличении – падает. Подачу, напор и мощность центробежных насосов можно изменить, уменьшив (обточив) диаметр рабочего колеса. Это предусматривается конструктивными решениями заводов-изготовителей. Параметры центробежного насоса при обточке колеса изменяются так же, как и при изменении частоты вращения:

$$\frac{Q_1}{Q} = \sqrt{\frac{H_1}{H}} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N}} = \frac{D_1}{D}, \qquad (14.4)$$

где $D$ и $D_1$ – диаметры нормального и обточенного рабочих колес.

Уменьшение диаметра рабочего колеса более чем на 20 % не допускается. Для расширения области применения некоторые заводы-изготовители выпускают насосы как с нормальными, так и с обточенными рабочими колесами. В случаях, когда условия работы насоса требуют частых изменений подачи из-за неравномерности водопотребления, наряду с изложенными приемами, применяют специальные методы регулирования, позволяющие обеспечить не только необходимые расход и напор, но и сохранить в диапазоне регулирования высокие значения КПД. Обычно это связано с использованием средств автоматического управления.

**Регулирование подачи дросселированием.** Во время монтажа центробежного насоса на напорной его стороне устанавливают задвижку для выполнения запорно-регулирующих функций. С ее помощью изменяют подачу насоса. По своему назначению и конструкции она служит как запорное устройство и регулятор, но при частых регулировках работает ненадежно. К тому же регулирование задвижкой (дросселированием) оказывается энергетически невыгодным: часть напора расходуется на преодоление искусственно созданного сопротивления в задвижке. Однако в ряде случаев дросселирование является эффективным, особенно при необходимости снижения напоров в трубопроводах на больших уклонах, когда напор не удается использовать и возникает необходимость в снижении его. Такое регулирование применяют на закрытой оросительной сети полустационарной системы для поддержания постоянства давления на входе к дождевальным машинам («Фрегат»). Сущность и энергетические характеристики этого

метода регулирования приведены на рис. 14.8.

При полностью открытой задвижке рабочая точка $A_1$ будет находиться на пересечении характеристик трубопровода $S_1$ и насоса $Q$–$H$. Подача насоса соответствует значению $Q_{A1}$. Отрезок $h_{T1}$ характеризует потерю напора на трение при движении жидкой среды со скоростью $v$, соответствующей подаче $Q_{A1}$. Для уменьшения подачи до значения $Q_{A2}$ частично прикрывают задвижку. Сопротивление изменит общее сопротивление трубопровода, и крутизна характеристики увеличится (точка пересечения $A_2$). Потерю напора определяют по сумме отрезков $h_{T2} + h_{зд}$, обозначающих соответственно потери в трубопроводе и в задвижке. КПД насосной установки снизится. Мощность, теряемую при дросселировании, находят по формуле:

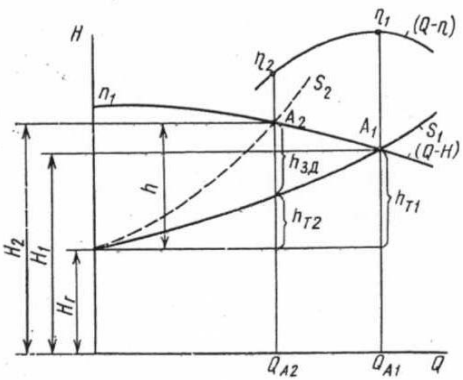



Рис. 14.8. Характеристика насоса и трубопровода при регулировании подачи дросселированием

$$\Delta N = \frac{\gamma g Q_{A2} h_{зд}}{1000\eta}, \text{ кВт}, \qquad (14.5)$$

где $Q_{A2}$ – подача насоса при прикрытой задвижке, м$^3$/с;

$h_{зд}$ – потеря напора в задвижке, м;

$\gamma$ – объемная масса, кг/м$^3$;

$\eta$ – КПД насоса при подаче $Q_{A2}$.

**Регулирование перепуском части подачи воды насосом во всасывающий трубопровод и впуском воздуха во всасывающий патрубок.** Уменьшить подачу воды в систему от $Q_A$ до $Q_B$ (рис. 14.9) можно, если перебросить часть перекачиваемой жидкости $Q_A$–$Q_B$ по обводной трубе во всасывающий трубопровод, т. е. установить перепускную линию. В этом случае при открытии задвижки на обводной трубе (устанавливается электроприводная задвижка для автоматизации процесса) меняется характеристика трубопроводной сети *2* на *3* со смещением рабочей точки насоса в положение *C*. Следовательно, для

обеспечения подачи $Q_B$ нужно через перепускную линию подать расход $Q_c$–$Q_в$. Напор, создаваемый насосом, уменьшается, а потребляемая мощность (кривая *4*) увеличивается.

С энергетической точки зрения способ регулирования подачи перепуском допустим для центробежных насосов с коэффициентом быстроходности $n_s > 300$, осевых и вихревых насосов. Коэффициент быстроходности – частота вращения рабочего колеса, которая при полезной мощности 735,5 Вт и подаче 75 л/с обеспечивает напор в 1 м.

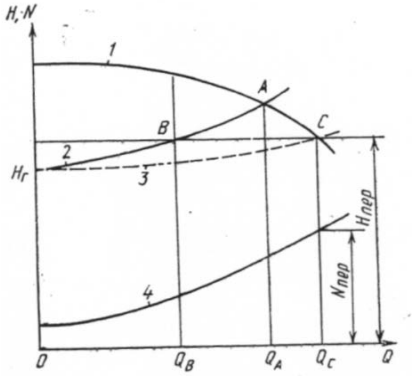


Рис. 14.9. Регулирование подачи центробежного насоса перепуском

В центробежных насосах меньшей быстроходности такое регулирование приводит к увеличению потребляемой мощности и перегрузке электродвигателя, усложнению систем управления, следовательно, снижению надежности установки.

Уменьшения подачи насоса при неизменной характеристике трубопроводной сети достигают за счет впуска определенного количества воздуха во всасывающий патрубок. Это допустимо и практически не ухудшает работы системы, если фактическая высота всасывания насоса значительно меньше допустимой. При впуске воздуха характеристики насоса $Q$–$H$ и $Q$–$\eta$ перемещаются вниз, что позволяет выбирать режим работы, обеспечивающий необходимую подачу воды в систему.

Количество воздуха, поступаемого во всасывающий патрубок насоса, обычно не превышает 5 % от объема перекачиваемой воды. Экономические показатели такого способа регулирования подачи насосов малой и средней производительности несколько лучшие по сравнению дросселированием задвижкой на выходе насоса. Для регулирования подачи применяются дополнительные специальные устройства по изменению или стабилизации рабочих параметров. При постоянной частоте вращения рабочего колеса они используются в рассмотренных способах количественного регулирования или их комбинаций.

**Регулирование подачи воды изменением числа и состава агрегатов.** Способ обеспечивает дискретное (ступенчатое) регулирование подачи воды в систему водоснабжения. Шаг дискретности постоянен и

соответствует подаче одного насосного агрегата. Для уменьшения шага дискретности и осуществления плавного регулирования устанавливают разнотипные агрегаты.

Например, для обеспечения диапазона регулирования 1:8 на станции можно установить четыре агрегата. Если они будут однотипными, то достижимый шаг дискретности составит 2/8 $Q$ (максимального расхода станции). Если установить агрегаты: два с подачей 1/8 $Q$, а два с подачей 3/8 $Q$, то достижима в два раза меньшая дискретность, равная 1/8 $Q$.

Число комбинаций разнотипных агрегатов всегда больше, чем однотипных, схема их автоматического выбора и переключения несколько усложняется. Усложнение оправдывается существенным улучшением режима работы и самое главное – уменьшением непроизводительных затрат. Практически такое регулирование можно выполнить двумя насосными агрегатами, но с установкой на каждом из них двухскоростных электродвигателей с соответствующей системой управления.

**Регулирование подачи воды при переменной частоте вращения рабочего колеса.** Способ регулирования насосных агрегатов изменением частоты вращения рабочего колеса является самым экономичным. Он основан на стабильных соотношениях важнейших параметров насосных агрегатов и частоты вращения их рабочих колес. С достаточной точностью для практических расчетов в доступных эксплуатационных диапазонах КПД насосов при изменении частоты вращения можно считать неизменным:

$$\eta_{\omega 1} = \eta_{\omega 2}. \tag{14.6}$$

Подача центробежных насосов пропорциональна частоте вращения рабочего колеса:

$$Q_2 = Q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}. \tag{14.7}$$

Напор пропорционален квадрату частоты вращения:

$$H_2 = H_1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2. \tag{14.8}$$

Мощность пропорциональна кубу частоты вращения:

$$N_2 = N_1\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3. \qquad (14.9)$$

В приведенных выражениях $\omega_2$ – новая частота вращения рабочего колеса, рад/с. Из анализа выражений видно, что

$$\frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{H_2}{Q_2^2} = \cdots = \frac{H_n}{Q_n^2} = \mathrm{K} = \mathrm{const}. \qquad (14.10)$$

Из последнего выражения вытекает параболическая зависимость $H = KQ^2$, указывающая, как располагаются на характеристике насоса $Q$–$H$ рабочие точки, имеющие равный КПД. В общем случае развиваемый центробежным насосом напор зависит от частоты вращения и расхода.

При полностью закрытой задвижке мощность на валу насоса составляет около 40 % от номинальной. Если постепенно открывать задвижку, мощность растет почти прямо пропорционально расходу:

$$N_2 = 0{,}4N_н + KQ. \qquad (14.11)$$

Во время регулирования частоты вращения насоса напор, развиваемый им, можно привести в соответствие с напором в системе при данном расходе, не поглощая задвижкой избыточный напор. Если насос преодолевает только динамический напор, мощность, потребляемая насосом, при регулировании частоты вращения пропорциональна кубу расхода:

$$N_2 = K_1Q^3. \qquad (14.12)$$

Сопоставив выражения для мощности при дроссельном регулировании подачи и регулировании ее изменением частоты вращения рабочего колеса, видим, что в последнем случае требуется значительно меньшая мощность, а подача возрастает с увеличением предела регулирования. Для определения необходимой мощности на валу насоса, в случае преодоления статического и динамического напора при изменяющемся расходе следует построить характеристики $Q$–$H$ для конкретного насоса при разных частотах вращения.

Совокупность характеристик центробежного насоса при различных частотах вращения приведена на рис. 14.10. Анализ характеристик показывает, что эффективность частотного регулирования снижается с увеличением доли статического напора.

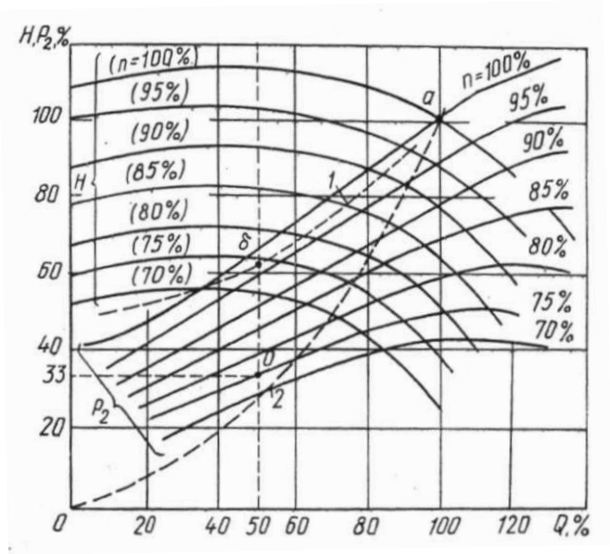



Рис. 14.10. Характеристики центробежного насоса при разной частоте вращения: *1* – характеристика работы насоса, преодолевающего 50 % статического и 50 % динамического напора; *2* – характеристика насоса, преодолевающего только динамический напор

Рабочая точка *б* выделена для 50%-ной номинальной подачи, 50%-ной статической и 50%-ной динамической составляющих напора (характеристика *1*), а номинальный режим работы при номинальной частоте вращения будет в точке *а*. При уменьшении расхода на 50 % рабочая точка *б* (характеристика *1*) пересекается с вертикалью, соответствующей 50%-ному расходу номинального режима. Здесь она оказывается на экспериментальной кривой *Q–H*, соответствующей 75 % номинальной частоты вращения. Требуемую мощность на валу насоса определяют точкой пересечения *N–Q* характеристики с вертикалью для 50 % расхода и, как видно из рисунка, она составляет 33 % от мощности, потребляемой в номинальном режиме.

Если бы насос преодолевал только динамический напор (характе-

ристика работы изображалась бы кривой *2*), то в этом случае необходимые характеристики *Q–H* и *Q–N* (на рис. 14.10 не показаны) при уменьшении расхода на 50 % пришлось бы уменьшить на 50 % и частоту вращения рабочего колеса. Потребная мощность составила бы 12,5 %, а не 33 %, как в первом случае.

Для изменения частоты вращения рабочих колес насосных агрегатов можно применять различные механические и электрические устройства. Даже при наличии в них дополнительных потерь методы качественного регулирования оказываются более экономичными по сравнению с любыми способами количественного регулирования. Специфический и важный параметр качественного регулирования насосных агрегатов – коэффициент глубины регулирования частоты вращения насосного колеса:

$$K_{\text{р}} = \frac{\omega_{\text{н}} - \omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}}}{Q_{\text{н}}}, \qquad (14.13)$$

где $\omega_{\text{р}}$ и $Q_{\text{р}}$ – требуемые по условиям работы минимальные значения частоты вращения и расхода для насосного агрегата с регулируемым электроприводом.

Для погружных насосных агрегатов типа ЭЦВ минимальное значение расхода не должно быть меньше величины, требуемой для предотвращения нагрева воды внутри корпуса насоса выше 25 °С, обычно принимают $Q_{\min} > 0{,}1Q_{\text{ном}}$. При выборе коэффициента регулирования необходимо учитывать диапазон изменения потерь в трубопроводной сети в зависимости от колебаний расхода по графику водопотребления.

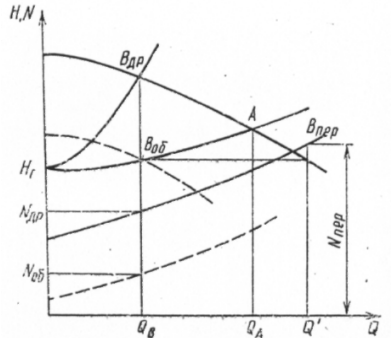



Рис. 14.11. Сравнение экономичности разных способов регулирования подачи центробежных насосов

На рис. 14.11 представлены сводные характеристики рассмотренных методов регулирования центробежных насосов с указанием затрат мощности при различных способах изменения подачи насосов.

На этом же рисунке соответственно показаны потери мощности.

Номинальный режим работы насоса будет в точке $A$ с расходом $Q_A$. В случае изменения его до значения $Q_в$ получим новые положения рабочих точек для различных способов регулирования: $B_{др}$ – при дроссельном регулировании задвижкой; $B_{об}$ – при частотном регулировании, изменяя частоты вращения рабочего колеса; $B_{пер}$ – регулирование перепускной линией, когда насос на выходе обеспечивает подачу:

$$Q = Q_в + Q_{пер}. \qquad (14.14)$$

При регулировании подачи изменением частоты вращения они будут минимальными, а при дроссельном регулировании существенно возрастут и будут максимальными в случае регулирования перепуском:

$$\Delta N > \Delta N_{др} > \Delta N_{об}. \qquad (14.15)$$

Приведенное соотношение справедливо для центробежных насосов, у которых коэффициент быстроходности $n_s < 300$. Для вихревых и осевых насосов, где с увеличением подачи затраты мощности уменьшаются, регулирование перепуском окажется более экономичным, чем регулирование дросселированием, но регулирование изменением частоты вращения по-прежнему будет более эффективным.

Рассмотренные режимы работы центробежных насосов, приемы регулирования показывают функционирование гидравлической системы насос – трубопровод, которое необходимо для правильного выбора насоса и обеспечения повышенной работоспособности, надежности и экономичности всей системы водоснабжения.

## 14.8. Гидропневматические напорно-регулирующие установки

Водонапорными баками в таких установках служат герметичные воздушно-водяные котлы. Установки бывают переменного и постоянного давления; последние из-за сложности эксплуатации применяются очень редко.

Автоматические водоподъемные установки типа ВУ предназначены для механизации и автоматизации водоснабжения жилых, комму-

нальных и общественных зданий, животноводческих ферм, небольших предприятий сельскохозяйственного производства и других объектов с суточным расходом воды до 150 м$^3$.

Автоматизированная водоподъемная установка ВУ с погружным насосным агрегатом приведена на рис. 14.12.

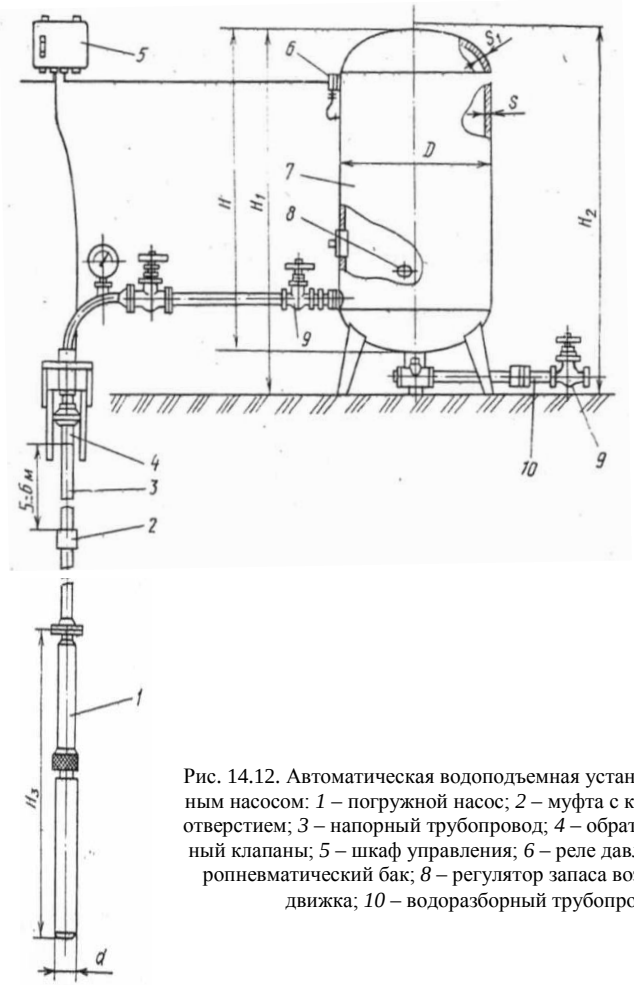



Рис. 14.12. Автоматическая водоподъемная установка с погружным насосом: *1* – погружной насос; *2* – муфта с калиброванным отверстием; *3* – напорный трубопровод; *4* – обратный и воздушный клапаны; *5* – шкаф управления; *6* – реле давления; *7* – гидропневматический бак; *8* – регулятор запаса воздуха; *9* – задвижка; *10* – водоразборный трубопровод

В процессе работы вода заполняет котел и сжимает в нем воздух, создавая такой же напор, как в сети. Если подача насосов равна расходу, то вся вода поступает в сеть. При расходе, меньшем подачи насоса, избыточное количество воды заполняет бак, давление в нем повышается, достигнув определенного заданного значения, реле *6*, установленное в верхней части бака, отключит магнитный пускатель и насосный агрегат. В тех случаях, когда насос не работает, вода подается потребителю из бака под напором сжатого воздуха и давление уменьшается. Обратное поступление воды в напорный трубопровод предотвращается за счет установки обратного клапана. При достижении минимальной величины давления реле включает насосный агрегат.

Давление воздуха при нижнем уровне воды в котле, соответствующем включению насосного агрегата, должно быть равным высоте водонапорной башни, чтобы создать расчетный напор в сети. Установки, в которых при накоплении и расходе регулирующего объема воды происходит изменение давления воздуха, называют *гидропневматическими установками переменного давления*. Во время работы такой установки происходят потери воздуха из-за утечек через неплотности соединений. Пополняют запас воздуха в баке один раз в неделю (отсутствие специальных устройств или их отказ).

Технические характеристики автоматических насосных установок с погружными насосами приведены в табл. 14.2.

Таблица 14.2. **Технические характеристики автоматических насосных установок с погружными насосами**

| Тип установки | Подача, $м^3/ч$ | Полный напор, м | Емкость, бака, л | Марка насоса | Мощность эл. двигателя, кВт | Источник водоснабжения |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ВУ-7-65 | 7,2 | 65 | 800 | ЭЦВ6-7,2×7,5 | 2,5 | Скважина диаметром 6 см |
| ВУ-7-115 | 7,2 | 115 | 800 | ЭЦВ6-7,2×120 | 4,5 | То же |
| В У-10-75 | 10,0 | 75 | 1250 | ЭЦВ6-10×85 | 4,5 | » |
| ВУ-10-180 | 10,0 | 180 | 1250 | ЭЦВ6-10×185 | 8,0 | » |

Регулирование подачи безбашенных установок достигается за счет изменения частоты периодических включений-отключений насосного агрегата. Частота циклов включений и выключений насоса в единицу

времени зависит от регулируемого объема пневматического напорно-регулирующего бака, производительности насоса и режима водопотребления.

Установки ВУ рассчитывают на работу в наиболее напряженном режиме с максимально возможным суточным числом включений $n$ (150–300). Часовая подача насоса должна в 1,1–1,3 раза превышать максимальный часовой расход. Режим водопотребления при выборе установки не принимается во внимание. При определении максимального расчетного числа включений учитывают, что возрастание их числа уменьшает емкость бака, увеличивает износ насосного оборудования, скважины и потребление электроэнергии на 1 м$^3$ поданной воды.

Межремонтный период современных центробежных насосов составляет 2–3 года. Рабочий ресурс электрической аппаратуры (магнитные пускатели, реле давления и др.), а также регулирующей арматуры (приемные и обратные клапаны, регуляторы запаса воздуха и т. д.) составляет в среднем 150–200 тыс. циклов. Исходя из равнопрочности отдельных узлов число циклов должно составлять 150–270 в сутки. Регулирующий объем гидропневматического бака (в м$^3$) определяют по формуле:

$$W_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{2n_{\max}^{\text{сут}}}. \qquad (14.16)$$

Обычно число включений для установок с гидропневматическими баками принимается от 150 до 250 в сутки. Большее значение $\left(n_{\max}^{\text{сут}}\right)$ принимается для установок мощностью до 5 кВт, меньшее – для более мощных установок, для которых требуются более сложное, дорогостоящее оборудование и управляющая аппаратура. Чтобы избежать износа установки, следует применять бак большего объема.

Регулирующий объем бака можно сократить за счет укомплектования установки группой насосов, управляемых отдельными реле давления. Схема управления должна обеспечивать поочередное включение насосов в зависимости от давления воды в баке. Полный объем гидропневматического бака определяется с учетом абсолютных значений и соотношения давления в нем воздуха. Изменение объема воздушной подушки в баке может быть определено по закону Бойля – Мариотта:

$$V_{\text{о}}P_{\text{о}} = V_1P_1 = V_2P_2\ldots, \qquad (14.17)$$

тогда

$$V_1 = \frac{V_o P_o}{P_1} \quad и \quad V_2 = \frac{V_o P_o}{P_2}, \tag{14.18}$$

где $V_о$ – полный объем гидропневматического бака, м$^3$;

$P_о$ – давление воздуха в опорожненном баке;

$V_1$ и $V_2$ – объемы воздушной подушки в баке, соответствующие минимальному $P_1$ и максимальному $P_2$ давлению воздуха в баке, Па.

Рабочий объем в баке (в м$^3$) $W_p = V_1 - V_2$, следовательно, полный объем:

$$V_о = W_р \frac{P_1}{P_о} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P_1}{P_о}}, \text{ м}^3. \tag{14.19}$$

Отношение $P_1/P_о$ отражает величину нерегулирующего объема бака. Одновременно $\frac{P_1}{P_о} = \frac{V_1}{V_о}$ – коэффициент запаса емкости бака, зависящий от конструкции и аппаратуры управления. Обычно отношение $P_1/P_о$ принимают в пределах 1,2–1,3. Для оптимизации соотношения в ряде случаев повышают давление воздуха в опорожненном баке за счет установки специального компрессора. Расчет и выбор автоматических насосных установок выполняют в следующем порядке:

1. Вычисляют максимальный часовой расход воды $Q_{ч\ макс}$ и расчетный напор у места расположения гидропневматического бака $H_{расч}$.

2. Определяют производительность установки:

$$Q_у = (1–1,2)\ Q_{ч\ макс}. \tag{14.20}$$

3. Определяют минимально необходимый напор установки в метрах водяного столба:

$$Н_у = H_г + \sum H_п + Н_{расч}, \tag{14.21}$$

где $H_г$ – геодезическая высота подъема воды до места расположения бака, м;

$\sum H_п$ – потери в трубопроводах, м.

4. Находят значения давлений включения и выключения насосов в метрах водяного столба (м в. ст.):

$$P_1 = \frac{Н_{расч}}{1,15}; \quad Р_2 = \frac{P_1 + 10}{\alpha} - 10, \quad \alpha = \frac{P_{1ср}}{P_{2ср}}, \tag{14.22}$$

где $P_{1ср}$ и $P_{2ср}$ – среднее давление включения и выключения насоса, выбирается в соответствии с рекомендацией;

α – малонапорные установки (Н < 50 м в. с. = 0,85–0,8);

α – средненапорные установки (Н = 50–100 м в. с. = (0,75–0,65);

α – высоконапорные установки (Н > 100 м в. с. = (0,65–0,6).

Для установок с несколькими насосами значения $P_1$ и $P_2$ принимают на 2–3 м в. с. большими, чем для одноагрегатных.

5. Определяют нужную емкость гидропневматического бака и выбирают типоразмер установки.

Помимо регулирующего объема в котле образуется «мертвый» запас воды (около 30 % расчетной регулирующей емкости) на случай нестабильной работы средств автоматики. Котел можно устанавливать как на поверхности земли, так и в заглубленном помещении.

Гидропневматическая напорно-регулирующая установка, смонтированная в подземной сборной железобетонной камере, в которой размещается устье скважины, оборудованной погружным центробежным насосом, арматура и станция управления приведены на рис. 14.13.

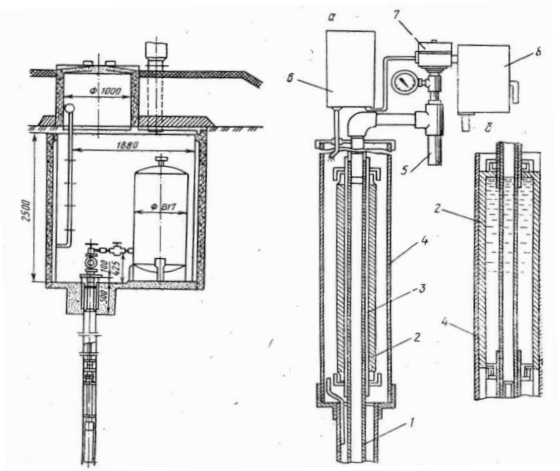



Рис. 14.13. Пневматическая напорно-регулирующая установка с погружным электронасосом, смонтированная в подъемной камере: *а* – перед пуском; *б* – перед остановкой; *1* – труба; *2* – емкость акумулятора; *3* – периферийный участок трубы; *4* – защитный кожух; *5* – напорный трубопровод; *6* – станция управления; *7* – реле давления; *8* – защитное устройство

Все гидропневматические аккумуляторы оборудуют предохранительным клапаном, устанавливаемым в нижней части его корпуса или

на водоводе. Он предохраняет котел и водопроводную сеть от разрыва в случае аварийного повышения давления.

В процессе работы гидропневматических аккумуляторов возникают значительные колебания давления в распределительной сети, отрицательно сказывающиеся на ее долговечности и надежности.

## 14.9. Источники питания повышенной частоты

В качестве источников питания погружных насосных агрегатов повышенной частоты вращения рекомендуются электромашинные, статические ферромагнитные и полупроводниковые преобразователи частоты.

Статические ферромагнитные преобразователи частоты (ФПЧ) с вращающимся магнитным полем применяются в насосных установках животноводческих ферм и комплексов. ФПЧ рассчитаны на входное линейное трехфазное напряжение сети 380/220 В, частоту тока 50 Гц с выходным напряжением 380 В, 150 Гц – при мощности 12 кВ·А. Погружной электронасос ВЭН4-16-90 имеет мощность 6,3 кВт.

Источниками электроэнергии служат аккумуляторные батареи и термоэлементы с преобразователями постоянного тока в трехфазный переменный.

Применяются тиристорно-магнитные преобразователи, состоящие из инверторов и трансформаторов с вращающимся магнитным полем, подмагничиваемых ярмом внешнего магнитопровода. На выходе преобразователя обеспечивается полная симметрия, синусоидальность токов и напряжений независимо от нагрузки.

Промышленность выпускает тиристорный преобразователь частоты типа ТМП-200 с тиристорно-магнитным преобразованием частоты на 200 Гц (для погружных электронасосов ВЭНЗ-0,5-25). Преобразователь автоматически включает и отключает электронасос, защищает его от перегрузок и обрыва фазы.

Полупроводниковые (тиристорные и транзисторные) преобразователи частоты позволяют регулировать частоту вращения насосов в широких пределах. Применение полупроводниковых преобразователей для регулируемых электроприводов отдельных погружных насосов экономически не эффективно по сравнению со статическими ферромагнитными преобразователями.

Пуск погружных насосных агрегатов при питании от ферромагнитных преобразователей частоты соизмеримой мощности имеет специфические особенности. Наиболее удобный одноступенчатый пуск

осуществляется прямым включением ФПЧ в сеть на полное напряжение.

В начальной стадии пуск сопровождается снижением напряжения на выходе ФПЧ до 50 % от номинального значения и ниже с соответствующим уменьшением вращающегося момента (в квадратичной зависимости), при этом первичный ток увеличивается незначительно. Такой пуск погружных насосов возможен лишь при условии, что значение вращающего момента электродвигателя будет превышать момент статического сопротивления не менее чем на 10 % во всем диапазоне изменения частоты вращения.

# 15. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК АРТЕЗИАНСКИХ СКВАЖИН

## 15.1. Особенности автоматизации артезианских насосных установок

Особенности автоматизации артезианских насосных установок зависят от типа насосных агрегатов и режимов их работы. Рассмотрим основные требования, предъявляемые к автоматизации, конструктивным особенностям насосных установок и технологическим режимам их работы.

1. Все артезианские насосные агрегаты в зависимости от их конструктивного исполнения могут быть разделены на две группы: агрегаты с электродвигателями, расположенными сверху, над устьем скважины, и погружные артезианские насосы, электродвигатель которых расположен под рабочей частью насоса и погружается в скважину ниже динамического уровня подземных вод (рис. 15.1). Типичным представителем первой группы является насосный агрегат типа АТН. Насос приводится в действие вертикальным двигателем, устанавливаемым на поверхности. Связь насоса с электродвигателем осуществляется при помощи трансмиссионного вала, опирающегося на резиновые подшипники. Вкладыши подшипников смазываются и охлаждаются водой, подаваемой насосом.

При остановке агрегата часть подшипников не находится в воде. Поэтому перед запуском насоса эти подшипники должны предварительно смачиваться водой. В автоматических установках, работающих без постоянного обслуживающего персонала, процесс смачивания подшипников должен быть автоматизирован.

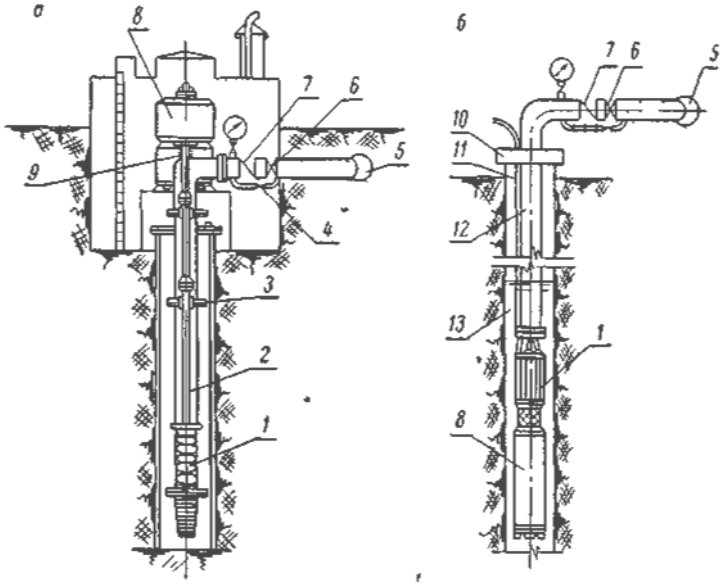



Рис. 15.1. Схема расположения насосной установки в скважине:
*а* – оборудованной насосом типа АТН; *б* – оборудованной насосом типа АП;
*1* – насос; *2* – приводной вал; *3* – резиновый подшипник; *4* – обводная труба;
*5* – магистральный трубопровод; *6* – задвижка; *7* – обратный клапан; *8* – электродвигатель; *9* – опорный подшипник; *10* – опорная плита; *11* – кабель;
*12* – водоподъемная труба; *13* – обсадная труба

Двигатель насоса типа АТН работает на подшипниках качения; верхний опорно-упорный подшипник смазывается жидкой смазкой, нижний – густой смазкой. Верхний подшипник несет большую нагрузку. Поэтому, несмотря на надежность работы подшипников качения, целесообразно при автоматизации осуществить автоматический контроль за температурой верхнего подшипника, тем более что не исключена возможность утечки масла из масляной ванны.

Нижний подшипник разгружен, и автоматический контроль за его состоянием не требуется.

В процессе эксплуатации наблюдаются некоторые неполадки, связанные с конструктивными особенностями данного агрегата: нарушение аксиальных зазоров между колесами и корпусом, значительная выработка подшипников насоса и трансмиссий, провертывание рабочих

колес на валу, прососы между секциями труб и насоса и др.

Показателем почти всех этих неисправностей является нагрузка двигателя. Поэтому токовая защита от перегрузки двигателя считается основной защитой агрегата. Она должна выбираться не по номинальным данным установки, а по фактической нагрузке, и тщательно регулироваться.

Типичными представителями второй группы насосов являются погружные насосы типа АП и новые насосы марки ЭЦНВ.

Наличие длинного трансмиссионного вала в насосном агрегате АТН обусловливает ряд его недостатков: возможность установки только в строго вертикальных скважинах; снижение к. п. д. насоса вследствие потерь, связанных с вращением приводного вала в потоке откачиваемой воды; значительную вибрацию, связанную с вращением динамически неуравновешенной трансмиссионной линии валов, и др.

Погружные насосы лишены этих недостатков. Агрегаты типа АП состоят из центробежного многоступенчатого вертикального насоса и заполненного водой электродвигателя, расположенного ниже насосной части и соединенного с ней посредством всасывающего патрубка.

Погружные насосные агрегаты не нуждаются в специальной смазке подшипников.

Из-за перечисленных недостатков насосы типа АТН по мере освоения погружных насосов марки ЭЦНВ будут постепенно заменяться. Но пока в эксплуатации будут находиться обе группы насосов, которые в одинаковой степени подлежат автоматизации.

Особенностью всех артезианских агрегатов является возможность их запуска при открытой задвижке напорной линии. Это обстоятельство облегчает автоматизацию, так как в ряде случаев установка электрифицированной задвижки и ее автоматизация не требуется.

Для своевременного выявления ненормальных режимов и предупреждения аварий схемы автоматического управления предусматривают следующие виды защит насосных агрегатов:

– от короткого замыкания;

– от перегрузок, возникающих как в результате механических неисправностей насосов, так и в результате работы электродвигателей на пониженном напряжении;

– от падения динамического уровня воды в скважине ниже уровня насоса;

– от работы двигателя на двух фазах;

– для насосов АТН осуществляется также защита от перегрева подшипников.

2. В зависимости от назначения скважин на воду различают следующие основные режимы их работы:

– полностью автоматизированные установки, управляемые датчиками (давления, уровня и др.). В таком режиме могут работать скважины, предназначаемые для водоснабжения и вертикального дренажа;

– насосные установки, пуск и остановка которых осуществляются персоналом на месте либо с диспетчерского пункта при помощи средств телемеханики. Такой режим эксплуатации пригоден преимущественно для артезианских скважин водоснабжения и орошения;

– насосные установки с комбинированным режимом управления; такие установки могут работать как в полностью автоматическом режиме, так и в режиме централизованного диспетчерского управления ими.

Комбинированный режим управления главным образом требуется для скважин вертикального дренажа с частичным использованием откачиваемых вод на орошение.

Схемы автоматизации должны отвечать требованиям и условиям, диктуемым перечисленными режимами: для полностью автоматизированных установок следует осуществлять блокировку, исключающую мгновенный запуск всех электродвигателей при появлении электроэнергии после кратковременного перерыва в ее подаче. Одновременно пуск всех присоединяемых к трансформаторной подстанции электродвигателей невозможен вследствие большого суммарного пускового тока. Поэтому применяются схемы, обеспечивающие самозапуск, т. е. автоматическое поочередное включение в сеть двигателей после восстановления напряжения. Часто работу групп скважин целесообразно автоматизировать в зависимости от уровня в общей для всей группы скважин контрольной скважине.

В этой скважине помещают датчики верхнего и нижнего уровней, определяющие режим работы группы скважин. При подъеме уровня воды до верхнего датчика вся группа насосов включается и откачивает воду. При падении уровня воды ниже установки нижнего датчика вся группа насосов отключается.

При этом в отдельных скважинах общей группы, вследствие возможного неравномерного притока, может не оказаться воды. Очевидно, что схемы автоматизации должны исключать эти скважины из числа работающих, независимо от подъема уровня воды в контрольной скважине.

Для вывода насосов в ремонт, их ревизии и опробования схемами автоматики предусматривается возможность ручного управления каждым отдельным агрегатом, независимо от работы других.

## 15.2. Схемы автоматического управления артезианскими насосными агрегатами

Станции автоматического управления насосными агрегатами должны удовлетворять требованиям, основные из которых изложены в предыдущем разделе. Для погружных насосов выпускаются специальные станции управления, поставляемые комплектно с насосным агрегатом.

Насосные агрегаты типа АТН комплектной поставки не имеют. Для них, применительно к заданному режиму работы, разрабатываются специальные станции управления.

Для ознакомления с работой этих станций рассмотрим несколько характерных схем.

На рис. 15.2 приведена схема станции управления насосным агрегатом 10АП с электродвигателем мощностью 35 кВт.

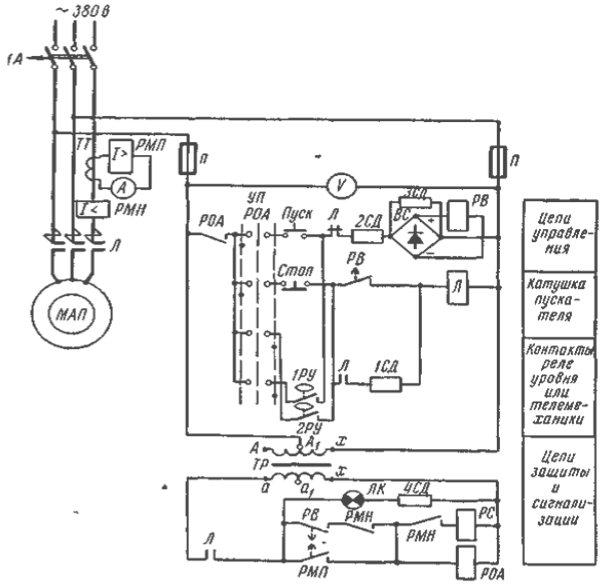



Рис. 15.2. Схема управления погружным электродвигателем насосного агрегата (10АП)

Станция управления обеспечивает: мгновенное отключение электродвигателя при коротких замыканиях с помощью автомата 1Л; защиту электродвигателя от перегрузки при помощи токового реле РМП типа ИТ-82Б/1, включаемого в цепь трансформатора тока; отключение электродвигателя при снижении его тока до $0{,}5I_н \pm 10$ %.

Такое снижение тока происходит при работе насоса вхолостую, когда уровень оказывается ниже заборной сетки насоса. В этом случае двигатель оказывается ненагруженным и отключается контактами реле минимального тока РМН.

Управление насосным агрегатом может быть местным, ручным, автоматическим при установке датчиков уровня или телемеханическим при управлении с диспетчерского пункта.

Ручное управление – кнопочное. Автоматическое или телемеханическое управление осуществляется соответствующими датчиками или контактами реле системы телемеханики.

При срабатывании реле максимального тока выпадает флажок сигнального реле *РС*, сигнализирующий причину аварии.

При возникновении аварийного состояния срабатывает реле *РОА*, которое выбрано с защелкой и ручным возвратом. Поэтому при возникновении аварии повторный пуск возможен лишь непосредственно с насосной станции. Дополнительные особенности схемы сводятся к следующему: катушка пускателя *Л* на напряжение 220 В включена через добавочное сопротивление *1СД* на напряжение сети 380 В. На время пуска сопротивление *1СД* закорачивается, обеспечивая надежное включение пускателя при возможных понижениях напряжения.

В станции управления применен понижающий трансформатор *ТР*, питающий реле *РОА*. В эту же цепь включен контакт реле *РМП*, также предназначенный для работы при напряжении не более 220 В.

Конструктивно станция выполнена в виде стального шкафа. Аппаратура монтируется на раме, встроенной в шкаф, а измерительные приборы и аппаратура управления – с наружной стороны на открываемой двери шкафа.

## 15.3. Схемы самозапуска артезианских автоматических насосных установок

Рассмотрим схемы, обеспечивающие самозапуск электродвигателей после кратковременного перерыва в подаче электроэнергии (рис. 15.3). Как было установлено, схемы самозапуска применяются на полностью автоматических насосных установках, присоединяемых к

одной трансформаторной подстанции. Существуют схемы поочередного индивидуального или группового самозапуска электродвигателей. В схемах индивидуального самозапуска применяются индивидуальные реле времени. При появлении напряжения электродвигатель включается в сеть через определенное время выдержки этих реле.

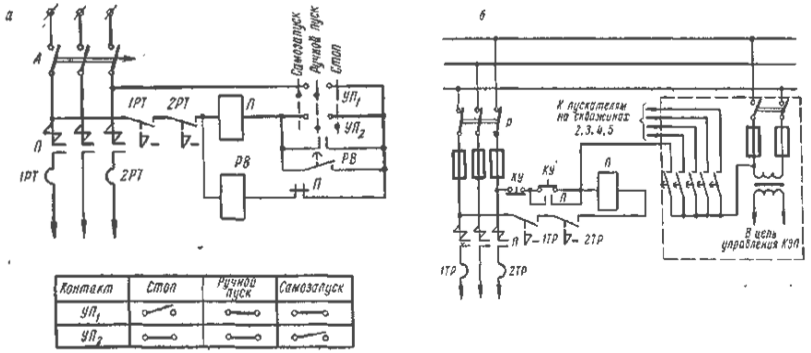



Рис. 15.3. Схема самозапуска электродвигателей: *а* – индивидуального, при помощи блока типа БУ-4; *б* – группового, с использованием реле *КЭП*

Первым включается насосный агрегат *1*, набирает номинальные обороты. Ток, потребляемый его электродвигателем, снижается до номинального. Это служит сигналом для срабатывания пускового реле насосного агрегата *2*. Реле запускает второй насосный агрегат. Аналогично (по величине потребляемого тока) и поочередно включаются остальные агрегаты.

Можно обеспечить аналогичную поочередность включения агрегатов с помощью реле времени (таймера). Реле времени включается одновременно с пуском насосного агрегата, отсчитывает заданное время, равное времени разгона агрегата, затем своими контактами включает следующий агрегат и т. д.

## 15.4. Электродные датчики и их установка в водопонижающих скважинах

Для автоматического управления насосом в зависимости от уровня воды в скважине в межтрубное пространство опускают электродные датчики. Учитывая, что обычно межтрубное пространство невелико, применяют малогабаритные датчики. На рис. 15.4 приведены два типа

датчиков: одноэлектродные (слева) и двухэлектродные (в центре и справа).

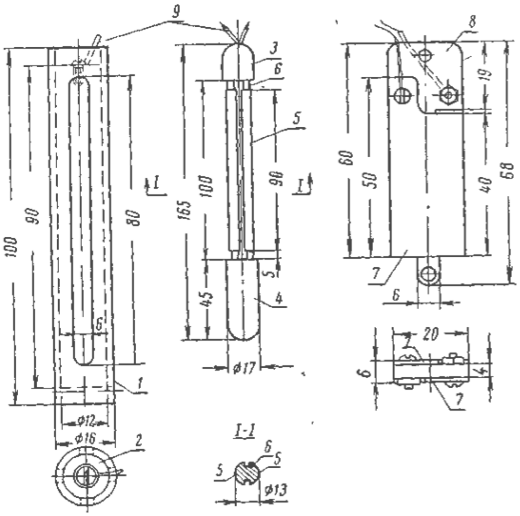



Рис. 15.4. Типы электродных датчиков для контроля уровня воды в скважине: *слева* – одноэлектродный; *в центре* и *справа* – двухэлектродные; *1* – изолирующий корпус; *2* – металлический стержень; *3* – верхний груз $d$ = 17 мм; *4* – нижний груз $d$ = 17 мм; *5* и *7* – контактные пластинки; *6* – изолирующая втулка $d$ = 13 мм; *8* – изолирующая пластинка; *9* – провод

Режим периодической работы насоса при заданной его производительности достигается путем подбора соответствующего положения датчиков. Положение нижнего датчика определяется уровнем, до которого необходимо откачивать воду из скважины. Уровень установки верхнего датчика определяется, с одной стороны, допустимым горизонтом грунтовых вод, а с другой – желательной паузой в работе насоса. Изменяя уровень верхнего датчика, можно получить заданную заранее паузу в работе насосной установки.

Режим работы скважины точному расчету не поддается: наиболее рациональный режим обычно устанавливается опытным путем после нескольких последовательных проб по определению положения верхнего датчика. Поэтому установка датчиков должна допускать возможность регулировки их положения.

# 16. АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

## 16.1. Степень автоматизации мелиоративных систем

Автоматизацию какого-либо технологического процесса следует начинать с изучения его характеристик, назначения, специфических особенностей, условий, в которых он протекает, а также свойств и характеристик отдельных объектов автоматизации.

В соответствии с этим нужно рассмотреть мелиоративные системы как объекты, которые намечено автоматизировать, и установить рациональные объемы работ.

Мелиоративные системы перераспределяют естественную влагу, создавая тем самым условия для интенсивного развития сельского хозяйства. Они делятся на три типа: оросительные, обводнительные и осушительные. Встречаются также их сочетания, например оросительно-обводнительные или оросительно-осушительные системы. Каждый тип соответственно имеет свои особенности в конструктивном исполнении и режиме эксплуатации.

Несмотря на различное назначение отдельных типов мелиоративных систем, они в целом могут быть рассмотрены, как однотипные объекты автоматизации. По этой причине последующее изложение основано преимущественно на наиболее характерном их типе - оросительных системах; однако отличительные схемы и устройства автоматизации объектов других мелиоративных систем рассматриваются отдельно.

Применительно к мелиоративным системам в зависимости от конкретных условий и технико-экономической целесообразности могут выполняться следующие операции.

1. Автоматический контроль состояния оборудования и сооружений.
2. Автоматическая защита от ненормальных режимов работы и повреждений.
3. Автоматизация работы отдельного объекта в целом.
4. Централизованный учет и контроль за водозабором и водораспределением.
5. Комплексная автоматизация водоподачи и водораспределения.
6. Телеавтоматизация процесса орошения.

Автоматический контроль повышает надежность работы и уменьшает возможность аварий.

При возникновении каких-либо отклонений от нормального состояния появляется предупредительный сигнал (звуковой или световой), например: о возникновении перегрева подшипников насосных агрегатов, об отклонении уровня воды от заданного, чрезмерном падении давления в трубопроводе и т. п.

Сюда относятся также автоматические измерения. Если при автоматической сигнализации контролируются лишь определенные значения параметров, например предельные, то измерительные приборы позволяют обслуживающему персоналу судить о значениях параметров в каждый данный момент и наблюдать за тенденцией их изменений.

Часто функции контроля и измерений выполняются одними и теми же приборами. Например, контактные манометры типа ЭКМ для измерения давления и поплавковые устройства типа ДСУ для измерения уровня позволяют получать непрерывные показания, а также дискретные предупредительные сигналы в случае нарушения установленных пределов. В этих приборах для передачи предупредительных сигналов имеются регулируемые контакты, замыкающиеся при достижении предельных значений измеряемых величин.

Устройства автоматической защиты предназначены для отключения механизмов и машин, а также участков электрических сетей в случае возникновения в них недопустимых перегрузок, коротких замыканий и других повреждений.

Благодаря устройствам автоматической защиты предупреждается развитие аварии; если же авария уже возникла, ее размеры ограничиваются.

Объектом автоматизации может служить агрегат, сооружение или узел сооружений, объединенных единым технологическим процессом: например, водовыпускное сооружение, насосный агрегат, насосная станция или головной водозаборный узел в целом.

В этом случае, помимо контроля и защиты, автоматизируется совокупность различных операций: управление процессом пуска и остановки агрегатов, программное управление их работой, изменение положения затворов, автоматическое регулирование технологических параметров и т. п.

Эксплуатация полностью автоматизированных объектов наиболее надежна, ибо автоматические устройства обеспечивают заданный рациональный технологический режим, исключают аварии по вине обслуживающего персонала и обеспечивают автоматическую защиту от повреждений. Вместе с этим такая эксплуатация и наиболее экономич-

на, так как обеспечивает наиболее рациональный технологический режим, а количество обслуживающего персонала сводится к минимуму. Его функции ограничиваются наблюдениями и ревизией оборудования и аппаратуры. На таких объектах, как правило, нет постоянного обслуживающего персонала.

Оросительные системы по методам создания на них комплексной автоматизации делится на две группы: первая – существующие и вторая – вновь сооружаемые оросительные системы.

Перевод оросительных систем первой группы из их современного состояния, которое пока характеризуется преимущественным использованием ручного труда, в системы с комплексной автоматизацией, как правило, целесообразно проводить очередями. При этом первыми должны осуществляться мероприятия; не требующие больших капитальных затрат, но большой эффективности. К ним в первую очередь относится диспетчерская централизация учета водораспределения. В этом случае сохраняется ручное управление, однако работа диспетчера существенно улучшается за счет правильного учета водораспределения и его оперативного контроля, позволяющего диспетчеру своевременно корректировать всякие отклонения от заданного режима. Одновременно улучшается и служба управления, которая находится под непрерывным контролем диспетчера. К объектам, которые должны быть автоматизированы в первую очередь, относятся также головные водозаборные и магистральные вододелительные узлы насосные станции и другие установки машинного водоподъема.

Эти сооружения, как правило, механизируются и электрифицируются независимо от автоматизации; они являются наиболее ответственными и дорогостоящими объектами, а дополнительные затраты на автоматизацию невелики и окупаются в 1–2 года только за счет экономии, получаемой от уменьшения штата обслуживающего персонала.

Таким образом, комплексная автоматизация на существующих оросительных системах может быть расчленена на ряд мероприятий, выполнение которых может не совпадать во времени.

Однако, учитывая, что все мероприятия, входящие в состав комплексной автоматизации, взаимосвязаны, осуществление любой ее очереди нужно сопровождать составлением ее полной схемы. В этом случае мероприятия, выполняемые разновременно, являются частями одного целого, легко увязываемыми между собой.

В процессе проектирования новых или капитальной реконструкции существующих систем следует предусматривать их комплексную ав-

томатизацию. При этом можно создавать системы нового типа, в которых автоматизация органически входит в состав системы и становится неотъемлемой ее частью.

И наоборот, как показал опыт, приспособление средств автоматизации к ранее построенным системам, как правило, сопровождается дополнительными и непроизводительными затратами и редко приводит к наиболее полному использованию всех возможностей автоматизации.

Основные управляемые объекты мелиоративных систем делятся на следующие четыре группы:

1) регулируемые гидротехнические сооружения линейного водораспределения. К этой группе относятся водовыпускные, вододелительные, перегораживающие и водосборные сооружения;

2) головные водозаборные и магистральные вододелительные узлы;

3) насосные станции машинного водоподъема, насосные станции откачки на дренажных коллекторах оросительных систем, станции осушительных систем и т. п.;

4) насосные установки артезианских скважин, используемых для вертикального дренажа, орошения и водоснабжения. К этой же группе могут быть отнесены скважины для наблюдения за уровнем грунтовых вод.

Гидротехнические сооружения мелиоративных систем вследствие большого разнообразия гидрогеологических, климатических и других естественных условий имеют различные модификации со специфическими конструктивными и эксплуатационными особенностями.

Однако, несмотря на большое количество типов, сооружения в пределах каждой из перечисленных групп выполняют аналогичные технологические задачи, имеют идентичный состав оборудования и схожую структуру эксплуатации. Это обстоятельство позволяет сформулировать для каждой из групп общие принципы автоматизации и рассмотреть методы их практической реализации.

## 16.2. Выбор затворов автоматизированных сооружений на мелиоративных системах

Затворы подбирают с учетом ряда факторов, основными из которых являются: пропускная способность затвора и гидравлические условия его работы, условия пропуска наносов и различных плавающих тел, тип уплотнений и фильтрация через них, стоимость затвора, его материал, вес и технологичность изготовления. Затворы для авто-

матизированных систем, помимо перечисленных факторов, должны удовлетворять ряду дополнительных требований, связанных с централизованным управлением с диспетчерского пункта. Требуется прежде всего повышенная надежность затворов. При маневрировании ручным затвором регулировщик находится на месте и может устранить возникающие мелкие неполадки, заклинивание затвора плавающими телами и т. п.; при автоматизации обслуживающий персонал отсутствует.

Иной становится технико-экономическая оценка. В отличие от затвора ручного управления, оцениваемого по своим качествам и стоимости, автоматизированный затвор оценивают вместе с подъемным механизмом с силовым приводом, мощностью привода и системой обеспечения его энергией, гидравлическими элементами и первичными приборами, обеспечивающими водомерность сооружения, аппаратурой автоматики и телемеханики. При такой технико-экономической оценке сравнительная стоимость собственно гидротехнического сооружения с затвором нередко уже не является определяющей, так как она по сравнению с другими составляющими стоимости автоматизированного сооружения не играет доминирующей роли.

Конструкции затворов и их свойства изучаются в специальных курсах. Нами будут определены лишь некоторые особенности плоских затворов с точки зрения их применения на автоматизированных системах. Наряду с этим будет рассмотрено несколько конструкций затворов, специально созданных по техническим условиям для автоматизированных систем.

В мелиоративных системах наиболее распространены затворы с пропускной способностью до 2 $м^3/с$ (до 80 % от общего количества), и их свойствами в основном определяется схема автоматизации линейного водораспределения в целом (далее они будут называться «небольшими затворами»).

Крупных гидротехнических сооружений соответственно меньше. Как правило, они концентрируются на головных водозаборных и магистральных вододелительных узлах. Хотя степень ответственности подобных сооружений велика, но при их автоматизации возникают меньшие технические трудности, чем при автоматизации небольших затворов. Объясняется это, как правило, наличием на крупных гидротехнических узлах источников электроэнергии, более совершенной конструкцией самих затворов и более тщательным их исполнением. Кроме того, при их автоматизации может быть использован опыт автоматизации подобных крупных затворов гидростанций. Плоские затворы благодаря простоте их конструкции и эксплуатации наиболее

распространены в оросительных системах. Небольшие затворы шириной и высотой 1–2 м обычно выполняются металлическими, скользящими и представляют собой конструкцию в виде уголковой рамы с листовой обшивкой (рис. 16.1).

Подъемное усилие плоского скользящего затвора:

$$F = G + T, \tag{16.1}$$

где $G$ – вес затвора, кг;

$T$ – сила трения в пазах, кг.

Рис. 16.1. Общий вид плоского затвора с подъемным механизмом

Как правило $T > 0$, поэтому скользящие затворы требуют значительных усилий не только при подъеме, но и при опускании, и поэтому их снабжают винтовыми подъемными механизмами. В настоящее время сконструированы электрифицированные винтовые подъемные механизмы с тяговым усилием до 20 т механизмы с тяговым усилием до 20 т. Подъемный механизм серии ВУП, кинематическая схема которого приведена на рис. 16.2 *а*, имеет в своем составе цилиндрический редуктор и грузовой узел. Редуктор компонуется из двух зубчатых цилиндрических пар. Грузовой узел представляет собой одноступенчатый конический редуктор, в котором ведомая коническая шестерня является гайкой грузового винта. Этот узел выполняется с двумя различными передаточными отношениями и имеет разные исполнения, отличающиеся диаметром и шагом винта.

Защита механизма от перегрузок осуществляется при помощи реле максимального тока, устанавливаемого в цепи питания электродвигателя. Подъемный механизм снабжен коробкой конечных выключателей для отключения затвора в крайних положениях и местным указателем степени открытия затвора; может быть также пристроен датчик телеизмерения. На случай отсутствия электроэнергии и для опробова-

ния подъемный механизм снабжается ручным приводом. Применено механическое блокировочное устройство, предотвращающее одновременную работу ручного и электрического приводов. Скорость подъема затвора электроприводом лежит в пределах 0,1–0,3 м/мин, а при подъеме вручную – 0,03–0,22 м/мин. Для всей серии в качестве электропривода принят фланцевый асинхронный короткозамкнутый электродвигатель мощностью 1,7 кВт.

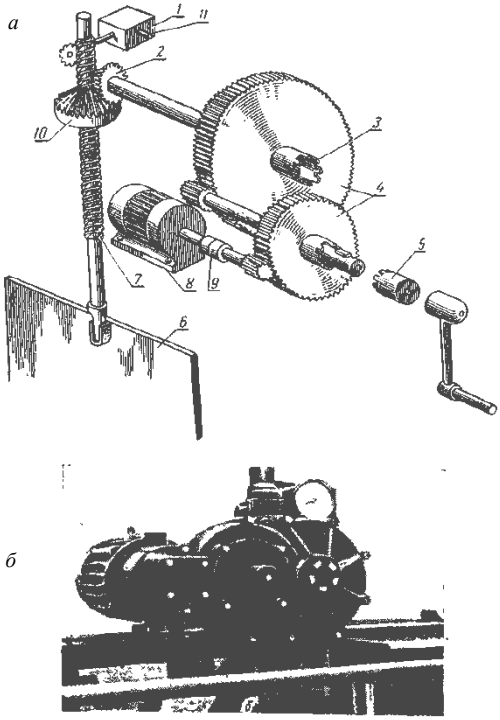



Рис. 16.2. Винтовой подъемный механизм серии ВУП: *а* – кинематическая схема; *б* – общий вид; *1* – коробка УКВ; *2* – коническая пара; *3* – вал отбора мощности; *4* – цилиндрический редуктор; *5* – стакан блокировки ручного управления; *6* – затвор; *7* – винт; *8* – электродвигатель; *9* – муфта; *10* – гайка; *11* – ось для присоединения приборов телеуправления

В подъемном механизме типа ПЗУ применен червячный редуктор, в котором червячное колесо является гайкой грузового винта. Защита механизма от перегрузок осуществляется при помощи специальной

фрикционной муфты, которая устанавливается в кинематической цепи подъемника и позволяет регулировать крутящий момент, передаваемый на червячную пару.

Благодаря этому можно при увеличении длины грузового винта уменьшить посадочное усилие, сохраняя неизменной величину тяги. В этой серии предусматривается уменьшение посадочного усилия на $^1/_3$ и на $^2/_3$ от силы тяги. Таким образом, каждый тип подъемника имеет три исполнения, отличающихся длиной грузового винта. Мощность электродвигателя меняется в зависимости от величины тягового усилия в пределах 1–2,2 кВт.

В подъемных механизмах серии ЭВ также применен червячный редуктор, в котором червячное колесо является гайкой грузового винта. Верхний конец грузового винта ввинчивается в грузовую гайку, спаренную с венцом червячного колеса. Червячный вал заканчивается с одного конца квадратной головкой для рукоятки ручного привода, с другого конца – для соединения с валом электродвигателя. Со стороны рукоятки конец червячного вала прикрыт колпачком ручной блокировки, который перед установкой рукоятки нужно снять, размыкая при этом конечный выключатель в цепи управления электродвигателем. Защита механизма от перегрузок осуществляется также, как и в подъемниках типа ВУП, при помощи реле максимального тока. Мощность электропривода дифференцирована в зависимости от величины тягового и дожимного усилий. Для всей серии принята шкала мощностей 0,27 – 0,4 – 1 – 1,7 – 2,8 кВт. Например, для подъемника с тяговым усилием в 1 т при скорости подъема 0,3 м/мин принята мощность, равная 1 кВт.

## 16.3. Минимальная необходимая мощность электропривода

Большой интерес представляет минимально потребная мощность электродвигателя подъемника для наиболее массовых затворов оросительных систем с пропускной способностью до 2 м$^3$/с. Именно эта мощность определяет схему электроснабжения и схему комплексной автоматизации в целом.

Расчет мощности электропривода выполнен для винтового подъемника плоского скользящего затвора с червячным редуктором. Как видно из кинематической схемы (рис. 16.3), у этого простейшего подъемника червячное колесо *1* является гайкой грузового винта *2*. Необходимо отметить, что расчет мощности электропривода подобных механизмов, несмотря на сравнительную простоту их конструкции, носит

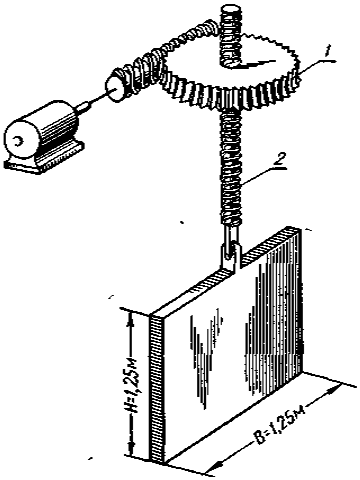



Рис. 16.3. Кинематическая схема подъемного механизма с червячным редуктором: *1* – червячное колесо; *2* – грузовой винт

приближенный характер. Объясняется это непостоянством и сложностью расчета нагрузки. Изменение нагрузки на затвор, поднимаемый под напором, происходит по сложному закону. Сказываются также гидродинамические явления. Основная составляющая нагрузки – сила трения – является переменной величиной, зависящей от таких факторов, как загрязнение, износ, состояние смазки и т. п. Следует также иметь в виду некоторые перекосы направляющих пазов, значительно увеличивающие подъемные усилия и, очевидно, не поддающиеся расчету. Поэтому приводимый ниже расчет имеет своей целью установить порядок величины коэффициента полезного действия (к. п. д.) подобного механизма и минимально необходимую мощность его электропривода.

Мощность электродвигателя подъемного механизма (в Вт) определяется по формуле:

$$P_{\text{д}} = \frac{F \cdot V}{75 \cdot 60\, \eta_{\text{об}}} \cdot 736, \qquad (16.2)$$

где $F$ – подъемное усилие, кг;

$V$ – скорость подъема затвора, равная 0,25 м/мин;

$\eta_{\text{об}}$ – общий к. п. д. подъемника;

$$F = k(G + 0{,}5\text{BH}^2 f 10^3), \qquad (16.3)$$

где $k$ – коэффициент запаса, равный 1,5;

$G$ – вес затвора, кг;

$B$ – ширина затвора, равная 1,25 м;

$H$ – высота затвора, равная 1,25 м;

$f$ – коэффициент трения для стали по стали без смазки с учетом загрязнения, равный 0,5.

$$F = 1{,}5(180 + 0{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}25^2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^3) \cong 1000 \text{ кг}.$$

Подъемное усилие в 1 т обычно является минимальным расчетным усилием при конструировании унифицированных подъемников. Мощность, необходимая для подъема затвора,

$$P_{\text{зат}} = \frac{1000 \cdot 0{,}25}{75 \cdot 60} \cdot 736 = 41 \text{ Вт}.$$

Определим общий к. п. д. подъемного механизма:

а) крутящий момент на винте с учетом трения в резьбе винт-гайка:

$$\mathrm{M_р} = FR_{\text{ср}}\mathrm{tg}(\alpha + \rho), \qquad (16.4)$$

где α – угол подъема винтовой линии резьбы винта, определяемый по формуле:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{t}{2\pi R_{\text{ср}}}, \qquad (16.5)$$

где $t$ – шаг винта;

$R_{\text{ср}}$ – средний радиус резьбы, для рассматриваемого случая:

$$R_{\text{ср}} = \frac{40 - \frac{6}{2}}{2} = 18{,}5 \text{ мм}.$$

Резьбу винта принимаем прямоугольной с диаметром 40 мм и шагом $t$ = 6 мм (такая резьба применена в винтовых подъемниках).

ρ – угол трения в резьбе; при коэффициенте трения в резьбе $f_{\text{р}}$ = 0,15 ρ = 8°30'.

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 18{,}5} = 0{,}0517; \quad \alpha = 2°56'.$$

Следовательно, $\mathrm{M_р}$ = 1000 · 0,0185 · tg(2°56' + 8°30') = 3,76 кгм;

б) момент трения в опорном подшипнике:

$$\mathrm{M_п} = FR_{\text{п}}f_{\text{п}}, \qquad (16.6)$$

где $R_п$ – радиус трения опорного подшипника; принимаемого равным 77,5 мм, что соответствует радиусу опорного подшипника с внутренним размером 60 мм;

$f_п$ – коэффициент трения в подшипнике, принимаемый равным 0,005.

$$М_п = 1000 \cdot 0{,}0775 \cdot 0{,}005 = 0{,}388 \text{ кгм.}$$

Общий момент на червячной паре

$$М_ч = М_р + М_п = 3{,}76 + 0{,}388 = 4{,}148 \text{ кгм.} \qquad (16.7)$$

Для обеспечения такого момента необходима мощность:

$$P_к = \frac{M_к \cdot n_к}{716{,}2} \cdot 736, \text{ Вт,} \qquad (16.8)$$

где $n_к$ – число оборотов гайки, равное числу оборотов червячной шестерни.

При скорости подъема затвора, равной 0,25 м/мин, и размере резьбы винта 40·6 мм число оборотов червячного колеса равно:

$$n_к = \frac{0{,}25}{0{,}006} = 41{,}8 \text{ об/мин.}$$

Отсюда

$$P_к = \frac{4{,}148 \cdot 41{,}8}{716{,}2} \cdot 736 = 178 \text{ Вт;}$$

в) коэффициент полезного действия червячной пары:

$$\eta_ч = \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}(\beta + \rho')}\,\eta, \qquad (16.9)$$

где β – угол подъема винта на червяке, равный 4°46' для однозаходного червяка с $d$ =12;

ρ' = 2°30' – приведенный угол трения стали по бронзе, соответствующий коэффициенту трения $f$ = tg ρ' = tg 2°30' = 0,6435;

η = 0,97 – коэффициент, учитывающий потери на трение в опорах червячной передачи в размере 3 %от величины передаваемой мощности;

$$\eta_{ч} = \frac{\text{tg}\, 4°46'}{\text{tg}(4°46' + 2°30')} \cdot 0{,}97 = 0{,}635.$$

Мощность (в Вт), которая должна быть подведена к подъемнику, с учетом к.п.д. червячного редуктора:

$$P_{п} = \frac{P_{к}}{\eta_{ч}} = \frac{178}{0{,}635} = 280 \qquad (16.10)$$

г) общий к.п.д. винтового подъемного механизма в целом:

$$\eta_{об} = \frac{P_{зат}}{P_{п}} = \frac{41}{280} = 0{,}145. \qquad (16.11)$$

На рис. 16.4 приведена энергетическая диаграмма, на которой, согласно приведенному расчету, дано распределение потерь в отдельных звеньях механизма.

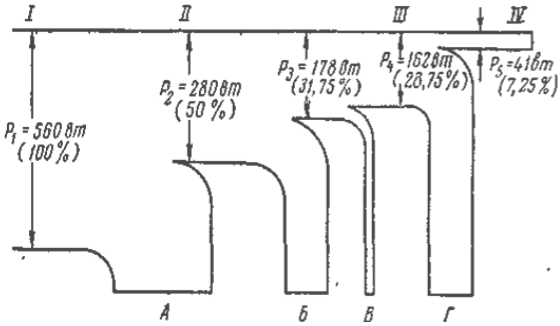



Рис. 16.4. Энергетическая диаграмма винтового подъемного механизма с электроприводом: I – мощность источника энергии; II – мощность на валу двигателя, подводимая к червячной передаче; III – мощность, подводимая к узлу винт-гайка; IV – мощность подъема затвора – 41 Вт (7,25 %); *А* – потери в двигателе – 280 Вт (50 %); *Б* – потери в червячной передаче – 102 Вт (18,25 %); *В* – потери на трение в опорном подшипнике – 16 Вт (2,9 %); *Г* – потери на трение в резьбе гайка-винт – 121 Вт (21,6 %)

Из диаграммы следует, что коэффициент полезного действия подобного подъемного механизма чрезвычайно мал. Около 80 % подведенной мощности теряется в винтовом подъемнике и червячном редукторе. Следовательно, без коренных изменений данной конструкции существенно снизить потребную мощность не представляется возмож-

ным. Минимальная мощность асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, которая может быть выбрана для рассматриваемого подъемника (учитывая номенклатуру электродвигателей), $P_2$ = 0,4 кВт. При такой мощности электродвигателя централизованное электроснабжение гидротехнических сооружений осуществляется напряжением 380 В.

Следовательно, на основании выполненного расчета может быть сделан следующий вывод. Плоские затворы с винтовыми подъемными механизмами в их современном конструктивном исполнении обусловливают, как правило, осуществление высоковольтного варианта электроснабжения, что в большой степени удорожает и усложняет автоматизированный затвор. Кроме того, собственно плоский затвор не обладает водомерностью, и для измерения пропускаемого им расхода с передачей показаний на диспетчерский пункт необходим специальный гидравлический элемент и первичный измерительный прибор, что также влияет на объем работ и общую стоимость одного автоматизированного гидротехнического сооружения с плоским затвором. Поэтому применение небольших плоских затворов на вновь сооружаемых автоматизированных системах является спорным. Приведенные ниже конструкции затворов, созданные с учетом требований автоматизации, подтверждают технико-экономическую целесообразность разработки новых типов затворов. Однако пока найдены лишь частные решения для замены небольших плоских затворов, которые, кроме того, установлены на всех действующих системах, и их массовая замена не целесообразна. Поэтому в ближайшие годы, очевидно, плоский затвор будет наиболее распространен на оросительных системах.

## 16.4. Выбор электропривода

Электроприводом винтовых подъемных механизмов служит трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель. К его достоинствам относятся простота и надежность конструкции, минимальная из всех типов двигателей стоимость, элементарный уход и низкая стоимость эксплуатации. По условиям работы и конструктивным особенностям наиболее подходят для приводов механизмов затворов крановые двигатели; поэтому во всех случаях, когда представляется возможным, рекомендуется выбирать этот тип. Однако применяются и асинхронные двигатели общепромышленной единой серии, хотя это менее целесообразно.

Опыт установки электрифицированных подъемных механизмов для

плоских скользящих затворов с подъемными усилиями 1–2 т показал, что фактическая потребная мощность электропривода нередко выше полученной по расчету. Объясняется это, по-видимому, в первую очередь недостаточно тщательным выполнением строительно-монтажных работ на этих сооружениях, из-за чего возникают перекосы пазов. Кроме того, в пазы набивается мусор, что создает дополнительные, по сравнению с расчетными, усилия на подъемные механизмы. Таким образом, автоматизация управления предъявляет более высокие требования к качеству строительства гидротехнического сооружения. Следует обеспечивать вертикальность направляющих пазов, правильность установки закладных частей и подъемных механизмов. Наряду с этим, очевидно, необходимо считаться с трудностью тщательного выполнения строительно-монтажных работ на массовых мелких сооружениях, и для компенсации возможных погрешностей монтажа следует мощность электродвигателя для небольших сооружений принимать примерно в два раза больше расчетной.

При выборе электродвигателя следует выдерживать определенное соотношение между максимальным моментом двигателя и расчетной нагрузкой. Выбор двигателя с моментом, значительно большим, чем это определяется нагрузкой, может вызвать необходимость в повышении прочности механизма. Обычно эта прочность проверяется по нагрузке, соответствующей максимальному моменту двигателя. Если отношение между максимальным моментом и номинальной нагрузкой не превышает 1:2,5, то это соответствует обычным запасам прочности, принятым для конструирования подъемных механизмов. Двигатель с заниженным моментом может не обеспечить надежную работу затвора. Соотношение между максимальным моментом двигателя и расчетной нагрузкой определяется по формуле:

$$M_{max} = M_{ст} 1{,}4 \left( \frac{1}{0{,}85} \right)^2 \cong 1{,}95\, M_{ст}, \qquad (16.12)$$

где $M_{ст}$ – максимальный статический момент нагрузки.

Формула получена на основании следующих соображений: при пуске электродвигателя допускается снижение напряжения до 85 % номинального. При этом максимальный момент, пропорциональный квадрату напряжения, снижается до 72 %. В этих условиях максимальный момент должен превышать максимально возможный момент статической нагрузки на 30–40 %, для того чтобы обеспечить уверенный разгон механизма.

Таким образом, минимальное отношение максимального момента двигателя к максимальному моменту статической нагрузки находится в пределах 1,95. Фактически это отношение лежит в пределах 1,95–2,9. Верхний предел определяется номенклатурой двигателей, для которых шкала мощностей имеет обычно шаг 1,3–1,5.

Для двигателей, у которых пусковой момент значительно ниже максимального, выведенное соотношение следует относить к их пусковому, а не к максимальному моменту. Особенно это относится к короткозамкнутым двигателям общепромышленных серий, для которых пусковой момент обычно ниже максимального.

## 16.5. Скорость маневрирования затворами

Скорость маневрирования автоматизированными затворами линейного водораспределения принимается равной 0,2–0,3 м/мин. Такая скорость удовлетворяет требованиям технологического процесса. Более высокие скорости нежелательны, так как они соответственно ведут к увеличению мощности электропривода и удорожанию системы электроснабжения. Кроме того, при больших скоростях автоматическое управление затворами усложняется; уменьшается точность отработки задания. Увеличение скорости до 1 м/мин, а иногда и более применяется для затворов аварийного сброса и установленных в местах, где возможны быстрые изменения режима.

## 16.6. Автоматизация капельного орошения

В последние годы в отечественной и зарубежной практике начали применять новые способы локального орошения, в том числе капельное и подпочвенное (внутрипочвенное).

Локальное орошение отличается от орошения дождеванием или затоплением, при котором увлажняется вся поверхность почвы.

Этот метод имеет многочисленные преимущества: рациональное управление оросительной сетью, защита структуры почвы, независимость орошения от других приемов обработки почвы (работа на участке может осуществляться и во время полива), защита растений (так как листва не смачивается, то уменьшается вероятность возникновения всевозможных болезней).

Системы капельного и подпочвенного увлажнения с точки зрения автоматизации являются аналогами стационарных дождевальных систем.

Однако технология управления ими проще в связи с тем, что такие системы могут осуществлять полив непрерывно на протяжении всего вегетационного периода. Это дает возможность уменьшить число запорно-регулирующей арматуры на сети, упростить схемы регулирования водоподачи, удешевить систему и повысить надежность ее работы.

Применяется капельный способ преимущественно для орошения садов и виноградников. Вода к капельницам, орошающим каждое растение, подается полиэтиленовыми трубопроводами (поливными и распределительными). Одно из важных технологических требований способа, существенно влияющего на надежность и работоспособность системы, тщательная очистка оросительной воды от механических примесей. В связи с этим на системах капельного орошения вода очищается перед подачей на полив фильтрами тонкой очистки.

При этом система автоматизации насосной станции должна обеспечивать: изменение подачи в зависимости от числа одновременно работающих дождевальных машин; поддержание нормального режима сети (дежурный режим); остановку насосных агрегатов при возникновении неисправности на насосной станции или оросительной сети (аварийное отключение); блокировку, исключающую включение насосных агрегатов при понижении уровня воды в подводящем канале ниже установленной величины, и другие технологические операции.

На насосной станции должны предусматривать сигнализацию о состоянии основного и вспомогательного оборудования и отдельных узлов насосных агрегатов.

Система автоматизации внутрихозяйственной закрытой сети при работе машин «Фрегат», «Днепр» и «Волжанка» должна обеспечивать стабилизацию напора на входе в дождевальные машины. Для этой цели созданы специальные автоматические регуляторы стабилизации напора в сети.

Стационарные системы дождевания вследствие большого расхода труб (более 200 м на 1 га) и высокой их стоимости пока функционируют лишь на небольших участках. Автоматизация стационарных систем заключается в передаче и исполнении команд о включении или выключении отдельных групп дождевальных аппаратов. Наиболее изучены системы с гидравлическим управлением, в которых трубопроводы используются для передачи команд управления, исключая этим наличие колебаний линии связи. Гидранты – водовыпуски совмещаются с гидроуправляемыми клапанами, настраиваемыми на определенную программу работы. Открываются и закрываются клапаны гидравлическими импульсами при понижении давления в сети.

В отдельных случаях, чтобы упростить систему очистки воды, применяют струйчатое орошение, при котором капельницы имеют повышенный расход и подают воду к растению струйкой. Струйчатое орошение по технологии управления не отличается от капельного.

Для разработки качественной проектной документации системы капельного орошения следует привлекать квалифицированных специалистов, при этом дополнительные удельные затраты заказчика на проведение расчетов и проектирование могут составить примерно 10–15 % от расчетной стоимости оборудования или, по среднестатистическим современным данным для стран СНГ, не менее 200–300 долл/га. Но ещё до заключения договора с проектной организацией будущий владелец системы должен иметь объективное представление о составе и объемах предстоящих работ. С этой целью может быть полезным изложенное ниже краткое обобщение различных публикаций на эту тему.

Базовая комплектация системы капельного орошения (рис. 16.5) обычно включает:

– водозаборное сооружение из поверхностного или подземного источника водоснабжения, например, насосную станцию;
– фильтрационную установку;
– узел подкормки удобрениями растений;
– регулятор давления;
– магистральный трубопровод;
– раздаточные (распределительные) трубопроводы;
– воздушные клапаны;
– капельные линии с наружными или внутренними капельницами;
– соединительную и запорную фурнитуры;
– дополнительные устройства.

При монтаже системы в существующих садах и виноградниках поливные пластмассовые трубопроводы расположены на поверхности.

Фильтрационная установка – устройство, служащее для очистки воды от различных примесей, всегда размещаемое перед магистральными трубопроводами. В зависимости от степени загрязнённости воды в источнике, типа капельницы и величины орошаемой площади, могут использоваться различные типы фильтров. Ключевое требование к фильтру – задерживать и удалять любые частицы размером более 0,1 проходного сечения капельницы. Для предварительной очистки воды обычно используют песчаногравийные, щебеночные или керамзитовые фильтры; для окончательной очистки и удаления органических загряз-

нителей до уровня не более 140 мкм – фильтры второй ступени, например, сетчатые, дисковые (пластинчатые), фильтры с пенополистирольной загрузкой или гидроциклоны. В случаях использования воды питьевого качества из скважин можно ограничиваться использованием одного дискового или сетчатого фильтра.

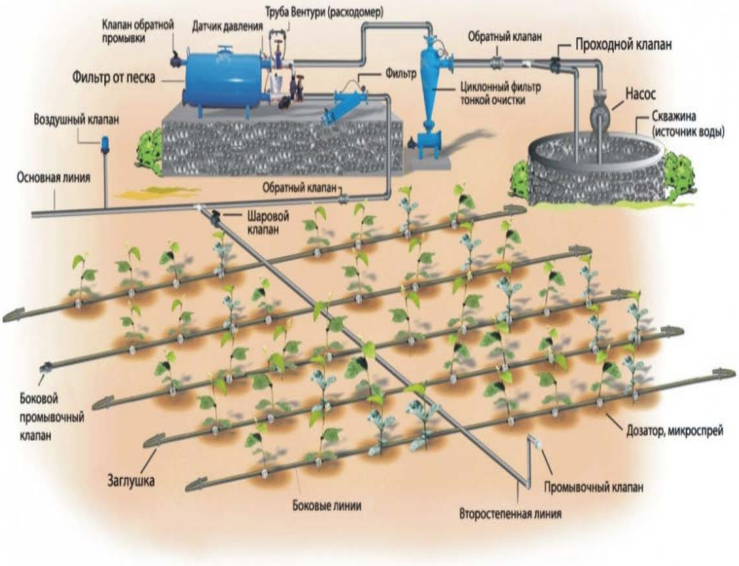



Рис. 16.5. Схема системы капельного орошения

Узел подкормки удобрениями растений – предназначен для дозированного внесения совместно с поливной водой удобрений и/или средств защиты растений. Обычно включает емкость для приготовления раствора удобрений, инжектор для подачи раствора в магистральный трубопровод, а также дозатор (микрайт, агрорайт) для регулирования подачи раствора.

Регулятор давления – устройство гидравлического и пружинного типа, предназначенное для снижения и поддержки на заданном уровне давления воды в системе, для предотвращения избыточного давления и гидравлического удара.

Магистральные и раздаточные трубопроводы соответственно пред-

назначены для транспортировки воды от водозаборного сооружения к узлу раздачи и далее – к капельным линиям. Обычно изготавливаются из непрозрачных полимерных труб, стойких к коррозии и агрессивным растворам. Чаще всего для магистральных трубопроводов используются трубы диаметром 40–160 мм, изготовленные из полиэтилена высокого давления, а для раздаточных трубопроводов – такие же трубы или гибкие армированные шланги из поливинилхлорида.

Узел раздачи – устройство в виде основы электромагнитного клапана, шарового крана, вентиля или задвижки, расположенное на стыке магистрального и раздаточных трубопроводов, регулирующее подачу воды в каждый поливной сектор.

Воздушные клапаны – устройства для регулирования воздуха в напорной системе. Когда система не работает, все трубопроводы и капельные линии обычно заполнены воздухом. Но при заполнении водой системы возникает избыточное давление, которое может вызвать гидравлический удар. При отключении подачи воды происходит обратный процесс, и в системе возникает разрядка давления (вакуум), что заставляет систему всасывать воздух через эмиттеры капельных линий. Это может вызвать засорение капельниц, деформацию трубопроводов или разгерметизацию системы. Во избежание этого воздушные клапаны должны устанавливаться в высочайших и/или конечных точках магистральных и раздаточных трубопроводов.

Капельные линии – ключевые элементы систем капельного орошения, предназначенные для дозированной подачи воды к каждому растению с помощью эмиттера – устройства, имеющего дозирующий канал и микрофильтр. Капельные линии, как правило, являются отводами от раздаточных трубопроводов и укладываются на поливном участке параллельно друг другу на расчетном расстоянии. Чаще всего капельные линии для садов и других многолетних насаждений представляют собой трубки/шланги, рассчитанные на давление до 3 атм, длиной до 750 м и диаметром 16–32 мм, изготовленные из полиэтилена низкого давления или полиэтилена высокого давления, со встроенными капельницами (эмиттерами). Для овощных культур более предпочтительны капельные ленты на основе полиэтилена низкого давления, рассчитанные на давление до 0,8–1 атм, а также со встроенными твердыми капельницами на расстоянии 10–50 см друг от друга. Доступный рынок капельного оборудования располагает обширным ассортиментом капельных лент – по расходу от 0,5 до 2 л/час, по конструкции – от мягких тонкостенных, рассчитанных на однолетнюю эксплуатацию, и до прочных толстостенных, которые можно исполь-

зовать в течение нескольких поливных сезонов (в среднем – 5 лет). Для предгорных участков с большими уклонами предпочтительным является использование сравнительно более дорогостоящих капельных линий с компенсированными по давлению эмиттерами.

Соединительная и запорная фурнитура – включает различные детали (угольники, тройники, переходы, муфты, сгоны, краны, заглушки, фитинги, краны, задвижки и др.), используемые при монтаже системы и регулировании водоподачи. В этих целях могут применяться как детали общего назначения, изготовленные из материалов, не поддающихся коррозии, так и специализированные устройства, например, стартконнекторы, служащие для герметичного соединения раздаточных трубопроводов 34 с капельными линиями, сливные заглушки на концевых участках капельных линий, обеспечивающие их промывку во время полива и др.

Устройства для измерения параметром технологического процесса – контрольно-измерительные приборы (расходомеры, счетчики количества воды, манометры), средства автоматизированного управления, (погодный контроллер, тензиометры, эвапорометры для контроля влажности почвы и определения поливных норм и др.). Уточнение потребной численности, размеров, конструкций и стоимости каждого из указанных элементов СКО устанавливается на стадии проектирования, на основании расчетов и маркетинговых исследований. Расчеты и проектирование СКО обычно производятся по стандартизованным методикам, детально изложенных в публикациях, приведенных в списке использованных источников информации. Для оперативного выполнения этих работ с меньшими затратами целесообразно привлекать проектные организации или специализированные подразделения предприятий-поставщиков капельного оборудования, располагающие компьютерными программами для автоматизированного проектирования СКО.

Технология строительства систем капельного орошения с подпочвенным расположением позволяет полностью механизировать процесс укладки поливных трубопроводов. Специальным трубоукладчиком их укладывают на глубине 40–60 см в створе будущего ряда растений и посредством хомутов специальной конструкции соединяют с распределительными трубопроводами. Таким образом, все распределительные и поливные трубопроводы находятся в почве на глубине, исключающей возможность повреждения оросительной сети почвообрабатывающими орудиями. На поверхность почвы выступают лишь отдельные питатели (25–30 см от поверхности почвы), указывающие

место будущих деревьев или кустов виноградника.

Отводные питатели устанавливают соответственно размещению растений в ряду на поливных трубопроводах в цеху. Затем поливные трубопроводы в сборе перед укладкой в почву проходят стендовые испытания на герметичность соединения и надежность в работе. Капельницы – водовыпуски крепят на поливном трубопроводе с помощью специального хомутика (когда система строится в существующем саду или винограднике) или устанавливают на отводном питателе (после посадки сада или виноградника). Они работают в заданном режиме расхода воды и обеспечивают его при загрязнении воды до 3 г/л и величине отдельных фракций до 0,1 мм.

У ствола дерева или виноградного куста устанавливают по одной капельнице. Поливная вода тонкой струйкой выливается на поверхность почвы у ствола растения и под действием гравитационных и капиллярно-всасывающих сил равномерно распределяется в зоне наибольшей насыщенности почвогрунта. Остальная часть площади междурядий сада или виноградника остается неувлажненной. Это способствует бесперебойной работе почвообрабатывающих орудий, опрыскивателей и машин для вывозки урожая. Очаговый характер увлажнения почвогрунта при капельном орошении позволяет экономить поливную воду, оросительные нормы при капельном орошении сокращаются в несколько раз по сравнению с поливами дождеванием или поверхностным способом.

Значительный интерес представляет система локального орошения, разработанная французскими специалистами. Отличительная особенность этой системы – относительно высокая скорость транспортирования воды.

Система включает напорное сооружение (гидрант или насосную станцию), распределительный и поливной трубопроводы, сетчатый фильтр и управляющие устройства (ручные или автоматические). Длина поливного трубопровода может достигать 200 м, а диаметр может составлять 20, 25 или 32 мм.

Рис. 16.6. Грязезащитная муфта:
*1* – расточенное отверстие;
*2* – специальные выступы (2 мм)

Водовыпускные отверстия имеют диффузоры, изготовленные из латуни толщиной 0,01 мм и защищенные грязезащитной муфтой (рис. 16.6).

Отверстия имеют диаметр от 1,2 до 2,1 мм с интервалами 0,1 мм.

Большой диаметр водовыпуск-

ного отверстия исключает возможность засорения твердыми частицами, взвешенными в воде.

Через каждое отверстие можно получать расход воды от 25 до 140 л/ч при обычно рекомендуемых напорах 3–15 м.

Диаметр отверстий и расстояние между ними назначены из условия обеспечения постоянного расхода воды по всей длине распределительного трубопровода (рис. 16.7).

Капельное орошение – самый экономичный способ увлажнения, при котором вода подается прямо в корнеобитаемый слой небольшими дозами, через специальные водовыпускные отверстия (капельницы), устанавливаемые через каждые 50...100 см на увлажняющих трубопроводах. Управление системой капельного орошения должно обеспечить нужную последовательность увлажнения отдельных участков и коррекцию нормы полива каждого из них. Первое требование выполняется за счет установки клапанов с электромагнитным приводом, управляемых программным устройством, второе требование – изменением напора в распределительных трубопроводах, а также дозированием времени работы отдельных секций поливаемого участка.

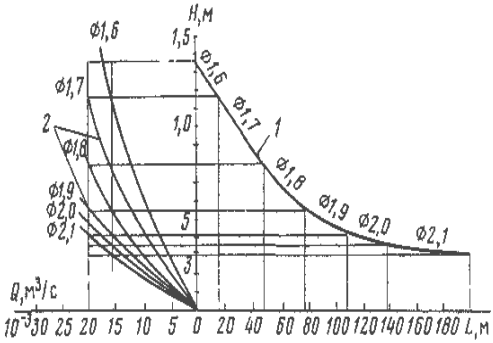



Рис. 16.7. График для определения диаметра отверстий на распределительном трубопроводе и расстояний между ними: *1* – пьезометрическая кривая перфорированного трубопровода; *2* – кривая расхода

САУ капельным орошением показана на рис. 16.8. Программа, определяющая очередность и время орошения участков, вводится в блок *1* задания и отработки программы. Сигнал разрешения полива участка поступает на блок *2* элементов *И* и логический блок *3* сравнения, где сравниваются заданное и действительное значения влажности, измеряемые влагомерами *б*. При дефиците влажности логический блок

вырабатывает команду управления соответствующим исполнительным механизмам *4*.

Известны системы автоматического управления капельным орошением, изменяющие давление в увлажнительных трубопроводах.

Определение сроков и норм полива при использовании систем орошения требует получения оперативной информации об усредненных значениях влагосодержания почвы на поливаемом участке. Соответствующую характеристику получают путем контроля влажности в ряде характерных точек с последующим преобразованием результатов измерений.

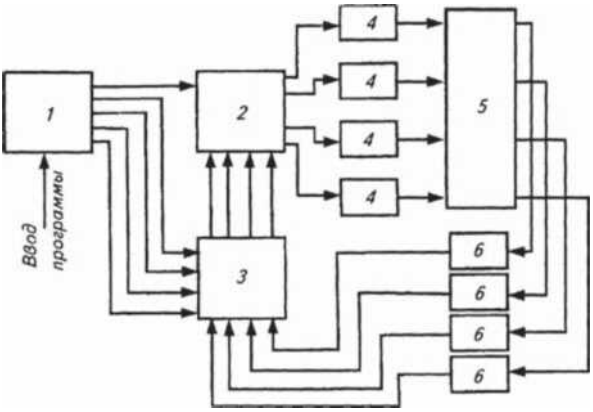



Рис. 16.8. Блок-схема управления капельным орошением: *1* – блок задания; *2* – блок элементов; *3* – логический блок; *4* – исполнительные механизмы; *5* – объект орошения; *6* – влагомеры

Усреднение влажности по глубине слоя почвы достигается выбором измерительного преобразователя, усреднение по площади – за счет контроля влажности в нескольких характерных точках поливаемого участка и последующего определения ее среднего арифметического значения.

# 17. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ

## 17.1. Устройство трехфазных асинхронных машин

Трехфазные асинхронные машины впервые были разработаны в конце 80-х – начале 90-х годов XIX века выдающимся русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским, который создал несколько типов этих машин. Статоры у них устроены одинаково и отличаются эти машины друг от друга лишь конструкцией ротора.

Электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов и состоящее из преобразовательного, электродвигательного, передаточного и управляющего устройств, называется *электроприводом*.

Рабочие машины бывают сравнительно простые, представляющие одно энергетическое машинное устройство, и сложные, состоящие из нескольких кинематически связанных между собой энергетических устройств.

В зависимости от уровня автоматизации управления различают неавтоматизированный, автоматизированный и автоматический электроприводы.

*Неавтоматизированным электроприводом* называют такой, при котором предусматривается участие человека в выработке начального управляющего воздействия и в последующей компенсации возмущающих воздействий.

В автоматизированном электроприводе предусматривается участие человека только в выработке начального управляющего воздействия (машинист крана, водитель троллейбуса и т. п.). Автоматизированный электропривод в подавляющем большинстве является многодвигательным. Примером автоматизированного электропривода может служить привод листопрокатного реверсивного стана, лифта, копировально-фрезерного станка и т. п.

*Автоматическим электроприводом* называют такой, при котором предусматривается участие человека только в надзоре за электромеханической системой. При таком уровне автоматизации роль человека сводится к монтажу и настройке, а также к общему наблюдению за состоянием системы автоматического управления объектом.

В качестве аппаратов, включающих систему в работу, применяют различного рода датчики, часовые механизмы, конечные выключатели и др.

**Конструктивные элементы статора.** Основными частями статора

являются неподвижный пакет магнитопровода и трехфазная обмотка (рис. 17.1). Пакет магнитопровода изготовлен в виде полого цилиндра, набранного также, как и магнитопровод трансформатора, из тонких листов электротехнической стали (рис. 17.2). Листы имеют форму колец с пазами, симметрично расположенными вдоль внутренней окружности.

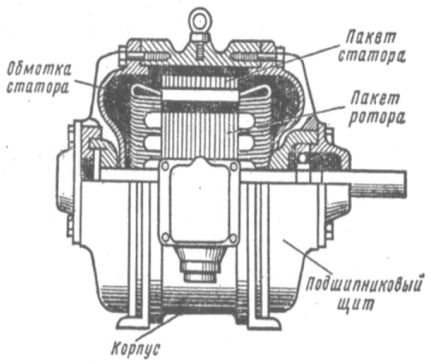



Рис. 17.1. Разрез трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

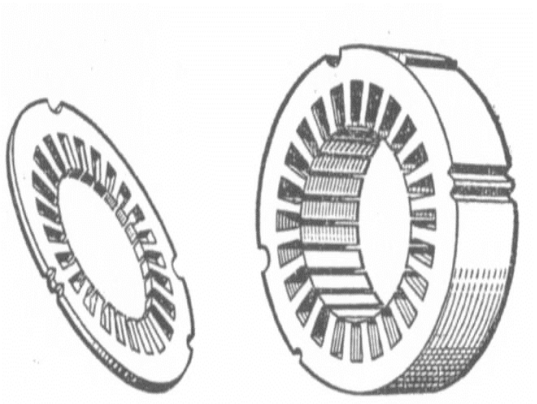


Рис. 17.2. Пакет статора и штампованный лист

В пазы пакета статора уложены стороны многовитковых мягких катушек, образующих три фазы обмотки. Пакет статора с обмоткой

запрессован в алюминиевый или чугунный корпус-оболочку, неподвижно закрепляемый при установке машины на фундаментной плите. С корпусом прочно соединены два боковых литых щита со сквозными центральными отверстиями для подшипников, в которых вращается вал ротора.

Начала и концы фаз обмотки статора присоединены к зажимам, расположенным в коробке выводов, укрепленной на корпусе. Большинство машин имеет коробку выводов с шестью зажимами, что позволяет соединять фазы обмотки треугольником или звездой. Обмотку статора таких машин можно включать либо в сеть с линейным напряжением, равным номинальному напряжению на фазе обмотки, либо в сеть с напряжением, превышающим в несколько раз номинальное фазное напряжение обмотки. Оба линейных напряжения указаны на паспортном щитке, укрепленном на корпусе.

Часть трехфазных асинхронных машин снабжена коробкой выводов с тремя зажимами. Соответствующие соединения фаз обмотки статора сделаны внутри этих машин. Они рассчитаны на включение обмотки в сеть с линейным напряжением, указанным в качестве номинального на паспортном щитке.

**Конструктивные элементы ротора.** Роторы трехфазных асинхронных машин состоят из пакета магнитопровода цилиндрической формы, набранного из тонких стальных дисков с пазами, и обмотки, расположенной в этих пазах. Пакет магнитопровода с обмоткой насажен на вал. Пакет ротора отделен от пакета статора небольшим равномерным зазором.

Различают два типа обмоток ротора.

Первый тип обмоток был разработан М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он предложил в пазы пакета ротора вставлять медные стержни, лишенные изоляции, а все концы стержней на обоих торцах пакета замыкать накоротко при помощи двух медных колец (рис. 17.3, *а*). Такие медные стержни и кольца применяют в современных асинхронных машинах мощностью более 100 кВт (рис. 17.3, *б*). В менее мощных машинах стержни изготовляют прямой заливкой пазов роторов расплавленным алюминием. Заодно со стержнями на обоих торцах пакета отливают кольца, а также вентиляционные лопасти (рис. 17.3, *в*).

Обмотку ротора в виде жесткой системы стержней с кольцами автор назвал «беличьей клеткой». Так как «беличья клетка» не имеет каких-либо соединений с внешней сетью и представляет собой короткозамкнутую систему проводников, ротор с этим типом обмотки принято называть *короткозамкнутым*.

Трехфазные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором являются основной продукцией электромашиностроительных заводов. Поэтому их относят к типу машин основного исполнения. На электрических схемах трехфазные асинхронные машины основного исполнения обозначают стандартным символом, приведенным на рис. 17.3, *г*.

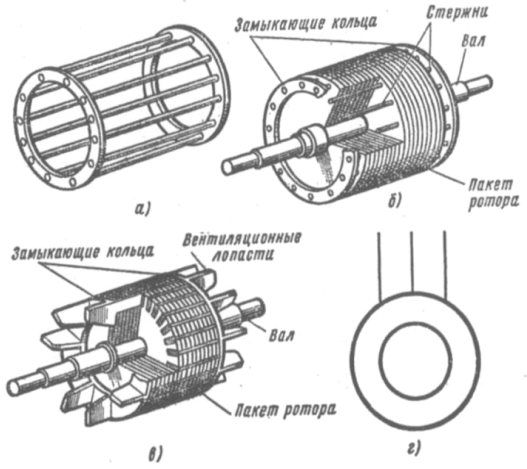



Рис. 17.3. Короткозамкнутый ротор: *а* – «беличья клетка»; *б* – медная стержневая клетка; *в* – алюминиевая литая клетка; *г* – стандартный символ асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

Второй тип обмоток был разработан М. О. Доливо-Добровольским в 1890 г. Он предложил в пазы пакета ротора укладывать такую же катушечную трехфазную обмотку, какая уложена на статоре; фазы обмотки соединять звездой и три свободных ее конца присоединять к трем медным контактным кольцам, насаженным на вал и изолированным как от него, так и друг от друга (рис. 17.4, *а*); на боковом подшипниковом щите укреплять щеткодержатель, причем так, чтобы расположенные в нем три группы угольных щеток надежно соприкасались с контактными кольцами ротора. Ротор с катушечной трехфазной обмоткой и контактными кольцами называют *фазным*.

Машины с контактными кольцами допускают включение реостатов или дросселей в цепи роторов, чем обеспечивается возможность улучшения их пусковых и регулировочных свойств. Однако они дороже и менее надежны, чем машины основного исполнения; область их применения ограничена теми особыми случаями, когда поставленные за-

дачи не могут быть разрешены применением машин с короткозамкнутым ротором. На электромашиностроительных заводах трехфазные асинхронные машины с контактными кольцами считают машинами, имеющими специализированное исполнение. Условное графическое обозначение таких машин на электрических схемах приведено на рис. 17.4, *б*.

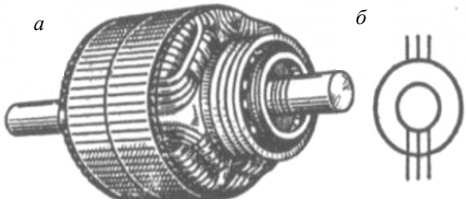



Рис. 17.4. Фазный ротор: *а* – внешний вид; *б* – стандартный символ асинхронной машины с контактными кольцами

## 17.2. Вращающееся двухполюсное поле

При работе машины все магнитопроводе и около боковых частей обмоток с переменными токами возбуждается изменяющееся магнитное поле. Если построить картину его линий, то можно обнаружить, что большинство их сцеплено как с проводниками обмотки статора, так и со стержнями обмотки ротора. Часть поля, образованного такими линиями, называют основным магнитным полем.

Остальные магнитные линии сцеплены либо только с обмоткой статора, либо только с обмоткой ротора. Подобно трансформатору эти части поля будем называть соответственно полями рассеяния статора и ротора.

Общее представление об особенностях основного поля трехфазной асинхронной машины можно получить из рассмотрения ее картины, схематически изображенной в поперечном разрезе на рис. 17.5. Здесь не показана обмотка ротора, а каждая фаза обмотки статора представлена только одной многовитковой катушкой, стороны которой уложены в два диаметрально противоположных паза. Начала и концы катушек обозначены соответственно буквами *a*, *в*, *c*, и *x*, *y*, *z*.

Плоскости и магнитные оси витков (нормаль к плоскости витка, восстановленная посередине между его сторонами и направленная вдоль магнитных линий поля, возбужденного положительным током витка) катушек расположены под углом 120º друг к другу.

Если на катушки подать трехфазную симметричную систему напряжений, то в них установятся синусоидальные токи $i_a$, $i_b$ и $i_c$, график которых представлен на рис. 17.5, *а*.

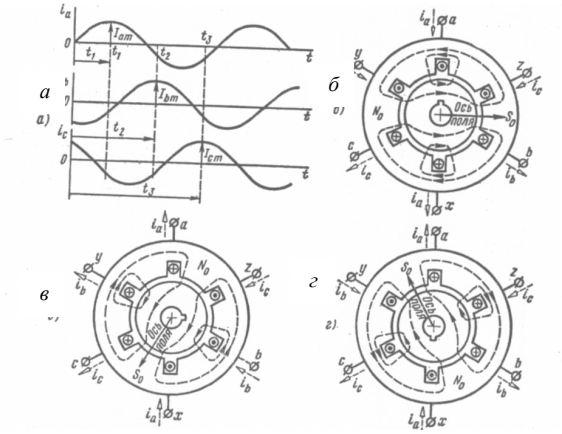



Рис. 17.5. График трехфазной системы токов (*а*) и упрощенные картины основного поля при максимальном положительном токе первой фазы (*б*), второй фазы (*в*) и третьей фазы (*г*)

Условимся считать ток в любой катушке положительным, когда он направлен от начала к ее концу, и отрицательным – при обратном направлении. Каждая катушка с током создает переменное магнитное поле. Три переменных магнитных поля, складываясь, образуют результирующее магнитное поле. Картина результирующего поля непрерывно изменяется, но ее можно построить для любого момента времени.

Построим картину результирующего поля для момента времени (см. рис. 17.5, *а*), когда ток в первой катушке (фазе) положителен и максимален. Направление тока $i_a$ в сторонах катушки $a - x$ условно обозначено в сечении витка точкой и крестиком (рис. 17.5, *б*).

Из графика тока видно, что в рассматриваемый момент времени токи во второй и третьей катушках отрицательны, т. е. направлены от концов катушек к их началам. Зная направления токов в сторонах катушек, можно построить приближенную картину результирующего поля, руководствуясь правилом правоходового винта.

В левой половине статора магнитные линии направлены из стали в воздух, а в правой половине – из воздуха в сталь. Следовательно, в рассматриваемый момент времени левая половина внутренней поверх-

ности магнитопровода статора представляет собой северный полюс, а правая – южный полюс. Ось полюсов (или ось симметрии магнитного поля) занимает в выбранный момент времени горизонтальное положение и совпадает с магнитной осью первой катушки.

Теперь выберем момент времени $t_2$, когда ток во второй катушке будет положительным и максимальным, а токи в первой и третьей катушках – отрицательными. Путем тех же рассуждений можно построить приближенную схему результирующего поля, показанную на рис. 17.5, *в*. Из нее видно, что ось симметрии магнитного поля занимает новое положение в пространстве, совпадая с магнитной осью второй катушки. Наконец, если построить схему результирующего поля для момента времени $t_3$ (рис. 17.5, *г*), когда ток в третьей катушке (фазе) будет положительным и максимальным, то можно установить, что положение магнитных полюсов в пространстве опять будет иным.

Ось симметрии результирующего магнитного поля располагается по оси той фазы, ток в которой максимален.

Схемы результирующего поля, построенные на рис. 17.5 для различных моментов времени, показывают, что конфигурация линий магнитного поля по мере изменения токов в неподвижных катушках не изменяется; происходит лишь равномерное одностороннее вращение вокруг оси машины (например, по движению часовой стрелки) всего спектра магнитных линий поля, следовательно, и вращение оси их симметрии. Такое поле принято называть вращающимся. Если изменить порядок чередования токов в катушках обмотки статора на обратный, например, принять, что ток является током катушки $c - z$, а ток $i_c$ создан в катушке $b - y$, то результирующее магнитное поле будет вращаться против движения часовой стрелки. Таким образом, направление вращения магнитного поля определяется порядком чередования токов в фазах обмотки статора: поле поворачивается в сторону фазы с отстающим током.

Из рассмотрения схем поля, изображенных на рис. 17.5, также следует, что трехфазная симметричная система токов возбуждает в магнитной системе машины поле с одной парой полюсов, если каждая фаза обмотки статора образована одной катушкой.

Определим скорость вращения двухполюсного поля. Его ось симметрии поворачивается на 360°, т. е. совершает один оборот за время $T_0$, равное периоду $T$ изменения тока. Следовательно, частота вращения $v_0$ двухполюсного поля как величина, обратная периоду $T_0$ вращения и выраженная числом оборотов в секунду, численно равна частоте $f_1$ токов в обмотке статора. По исторически сложившейся традиции

частоту вращения принято выражать числом оборотов $n_0$ в минуту.

Для двухполюсного поля:

$$n_0 = 60v_0 = 60f_1. \qquad (17.1)$$

Учитывая, что $v_0 = f_1$ найдем угловую скорость вращения двухполюсного поля:

$$\Omega_0 = 2\pi\, v_0 = 2\pi\, f_1 = \omega_1, \text{ рад/с}. \qquad (17.2)$$

Таким образом, угловая скорость вращения основного двухполюсного магнитного поля численно равна угловой частоте токов в обмотке статора.

### 17.3. Вращающееся многополюсное поле

Токи в трехфазной обмотке могут возбуждать не только двухполюсное, но и многополюсное вращающееся магнитное поле. Для этого количество катушек в фазе увеличивают в число раз, равное требуемому числу пар полюсов $p$ магнитного поля, а размеры катушек – уменьшают во столько же раз. Например, для создания поля с двумя парами полюсов ($p$ = 2) в каждую фазу обмотки статора включают по две катушки (рис. 17.6, *а*), а их угловые размеры (по сравнению с катушками двухполюсной обмотки, рис. 17.5) уменьшают в два раза, т. е. стороны витков укладывают в пазы, расположенные под углом 180/2 = 90° (рис. 17.6, *б*), а оси катушек разных фаз располагают под углом 120/2 = 60°.

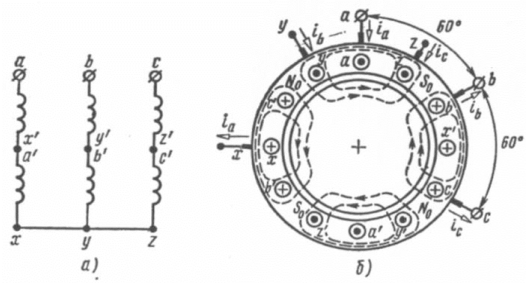



Рис. 17.6. Схема соединения катушек фаз (*а*) и упрощенная схема четырехполюсного поля (*б*)

Скорость вращения магнитного поля, образующего две пары полюсов, будет в два раза меньше, чем скорость вращения двухполюсного поля, так как за один период изменения токов полюсы поворачиваются на пространственный угол, равный 180°.

В справедливости этого можно убедиться путем построения схем поля, аналогичных рассмотренным выше (см. рис. 17.5).

Если в зазоре машины будет возбуждено шестиполюсное магнитное поле, то за один период изменения токов в катушках статора ось поля повернется на угол 120°, при восьмиполюсном магнитном поле – на 90° и т. д. Иначе говоря, при неизменной частоте токов в катушках фаз обмоток статора многополюсное магнитное поле вращается в пространстве медленнее двухполюсного в число раз, равное числу пар полюсов.

Поэтому угловая скорость вращения многополюсного магнитного поля относительно обмотки статора, называемая *синхронной скоростью*, может быть выражена формулой (в рад/с):

$$\Omega_0 = \frac{\omega_1}{p}. \qquad (17.3)$$

Соответственно частота вращения многополюсного поля меньше частоты вращения двухполюсного поля в число раз, равное количеству пар полюсов:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}. \qquad (17.4)$$

Во всех машинах переменного тока стремятся обеспечить пространственное распределение магнитной индукции поля вдоль воздушного зазора между статором и ротором по закону, близкому к синусоидальному, с тем чтобы ослабить вредное влияние высших гармонических составляющих поля и токов на энергетические показатели работы и механические свойства машин. Желательное распределение получают укладкой сторон витков катушек обмотки в несколько рядом лежащих пазов. Для этого каждую многовитковую катушку обмотки разделяют на соответствующее число секций.

Пространственное распределение векторов магнитной индукции вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре машины можно представить трехмерной диаграммой, изображенной на рис. 17.7 для шестиполюсной машины ($p = 3$); эту диаграмму следует представить себе вращающейся по окружности воздушного зазора с синхронной скоростью.

Вращающееся магнитное поле машины количественно характеризуют потоком Ф вектора магнитной индукции В через поверхность полюсного деления с площадью $\tau l$. Этот поток называют потоком полюса.

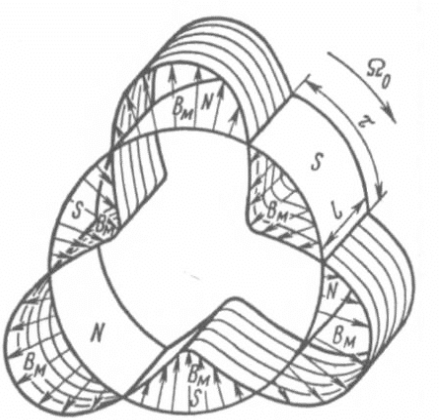



Рис. 17.7. Трехмерная диаграмма распределения векторов магнитной индукции основного поля в зазоре шестиполюсной машины

Для определения величины потока (в веберах) полюса пользуются средним значением $B_{ср}$ магнитной индукции (в Тл) по площади полюсного деления:

$$\Phi = B_{ср}\tau l. \qquad (17.5)$$

При синусоидальном распределении магнитной индукции с амплитудным значением $B_m$, когда ее среднее значение $B_{ср} = 2B_т/\pi$, величину потока полюса (в Вб) определяют соотношением:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_т \tau l. \qquad (17.6)$$

Отметим, что в трехфазной асинхронной машине, включенной в сеть с симметричной трехфазной системой напряжений, величина потока полюса вращающегося магнитного поля сохраняется неизменной при любом положении оси поля.

**Поля рассеяния.** Общее представление об особенностях полей рассеяния можно получить из рис. 17.8, где схематично изображены

линии поля машины, сцепленные лишь с одной катушкой обмотки статора. Подобную картину имеют и остальные линии поля рассеяния статора, а также линии поля рассеяния ротора. Вблизи отогнутых головок катушек или торцовых колец короткозамкнутой обмотки они целиком находятся в воздухе; вдоль сторон катушек, расположенных в пазах, – частично в стали, а частично в воздухе между зубцами магнитопровода.

Рис. 17.8. Упрощенная схема поля рассеяния катушки обмотки статора

Если учесть, что магнитные напряжения ферромагнитных участков магнитных линий полей рассеяния пренебрежимо малы по сравнению с магнитным напряжением участков этих линий в воздухе, то можно сделать заключение, что практически вся энергия поля рассеяния будет сосредоточена в магнитонейтральной среде. В отличие от основного вращающегося поля машины магнитные поля рассеяния не участвуют в процессе передачи электромагнитной энергии между статором и ротором, а их интенсивность незначительна.

Величины потокосцеплений $\Psi_{1\sigma t}$ и $\Psi_{2\sigma t}$ полей рассеяния обмоток статора и ротора (в Вб) можно считать прямо пропорциональными мгновенным значениям токов в обмотках:

$$\Psi_{1\sigma t} = L_{1\sigma} i_1 \text{ и } \Psi_{2\sigma t} = L_{2\sigma} i_2, \qquad (17.7)$$

где $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния фаз обмоток статора и ротора, принятые в качестве неизменных параметров обмоток машины.

Такое упрощение допустимо для полей рассеяния трехфазных асинхронных машин основного исполнения и для машин с фазным ротором.

В дальнейшем будет показано, что хотя поля рассеяния обмоток являются слабыми по сравнению с основным полем, однако пренебрегать ими нельзя, так как они оказывают значительное влияние на рабочие свойства машины.

## 17.4. Режимы работы трехфазной асинхронной машины

Трехфазная асинхронная машина может работать в трех режимах: двигателя, генератора и электромагнитного тормоза. Для уяснения принципов действия асинхронной машины, работающей в этих режимах, рассмотрим физические явления, возникающие в ней после включения обмотки статора в трехфазную сеть.

**Режим двигателя.** Пусть машина имеет короткозамкнутый ротор и двухполюсную обмотку статора, а трехфазная система токов возбуждает в магнитопроводе статора и ротора магнитное поле, вращающееся с синхронной скоростью $\Omega_0$ в направлении движения часовой стрелки (рис. 17.9, *а*). Допустим также, что электрическое (активное) сопротивление стержней «беличьей клетки» велико.

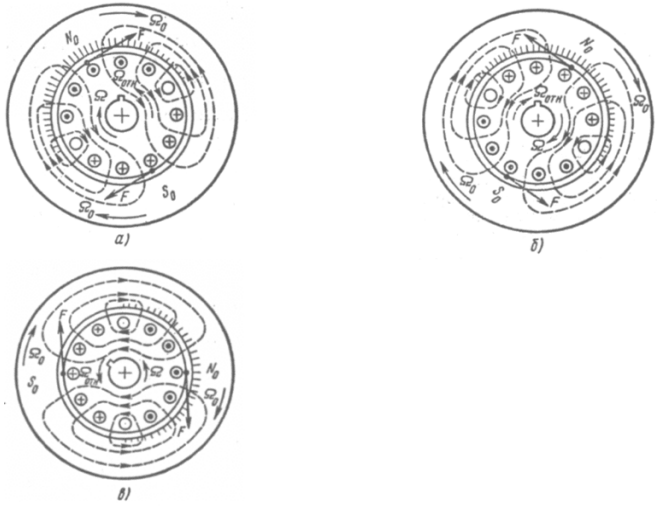



Рис. 17.9. Электромагнитные схемы трехфазной асинхронной машины, работающей в режимах двигателя (*а*), генератора (*б*), электромагнитного тормоза (*в*)

Тогда при неподвижном роторе в проводниках его обмотки вследствие пересечения их линиями вращающегося поля наведутся э.д.с. и в короткозамкнутой обмотке ротора установятся переменные токи, практически совпадающие по фазе с э.д.с. Так как проводники с токами ротора находятся в магнитном поле машины, то на них будут действовать механические силы. Направления э.д.с. и создаваемых ими

токов в короткозамкнутых проводниках ротора, а также электромагнитных сил, действующих на ротор, могут быть определены соответственно по правилам правой и левой руки. Следует только учесть направление относительного движения проводников ротора в магнитном поле; в рассматриваемом случае оно противоположно движению поля. Применив эти правила, найдем, что электромагнитные силы, приложенные к неподвижному ротору, создают пусковой момент, стремящийся повернуть ротор в направлении движения магнитного поля.

Если электромагнитный момент, действующий на неподвижный ротор, превысит тормозной момент на его валу, то ротор получит ускоренное движение в направлении вращения магнитного поля машины. По мере возрастания скорости вращения $\Omega$ ротора скорость $\Omega_0$–$\Omega$ относительного движения его проводников в равномерно вращающемся магнитном поле уменьшится, вследствие чего уменьшатся величины э.д.с. и тока в них, что повлечет за собой соответствующее изменение вращающего момента. Процессы изменения тока, вращающего момента и скорости вращения ротора прекратятся, как только наступит устойчивое равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора, и тормозным моментом (моментом сопротивления), создаваемым устройством, приводимым в движение электрической машиной. В этих условиях ротор машины будет вращаться с постоянной скоростью $\Omega$ и в его короткозамкнутых контурах установятся токи, обеспечивающие создание вращающего момента, равного тормозному.

Таким образом, принцип работы асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, которые наводятся этим полем в проводниках ротора. Очевидно, что возникновение токов в роторе и создание вращающего момента возможны лишь при относительном движении проводников ротора в магнитном поле машины. Из этого следует важный вывод о том, что ротор и магнитное поле асинхронной машины, работающей в режиме электрического двигателя, вращаются в пространстве в одном направлении, но с разными скоростями; скорость вращения ротора двигателя всегда меньше скорости вращения магнитного поля. С увеличением тормозного момента скорость вращения ротора уменьшается. При отсутствии внешнего момента сопротивления возбужденная машина будет находиться в режиме холостого хода, характеризуемом свободным вращением ротора со скоростью, близкой к синхронной. Лишь в теоретически возможном случае полного исчезновения внутренних сил трения ско-

рость вращения ротора может достигнуть синхронной скорости вращения поля. Тогда прекратится пересечение проводников ротора магнитными линиями поля и токи в роторе исчезнут. В этом случае говорят о режиме идеального холостого хода асинхронной машины.

Режим идеального холостого хода можно создать и в реальной машине, если скорость вращения ее ротора искусственно увеличить до синхронной скорости при помощи какого-либо постороннего двигателя.

Асинхронная машина, ротор которой вращается в направлении вращения магнитного поля со скоростью, превышающей скорость поля, работает в режиме генератора.

**Режим электромагнитного тормоза.** В третьем режиме – режиме электромагнитного тормоза – асинхронная машина работает тогда, когда ее ротор и магнитное поле вращаются в разных направлениях (рис. 17.9, *в*). Применив правила правой и левой руки, можно убедиться, что электромагнитный момент, возникающий от взаимодействия токов ротора с магнитным полем, вращающимся против направления вращения ротора, будет оказывать тормозящее действие на ротор. В режиме электромагнитного тормоза скорость относительного движения проводников ротора в магнитном поле превышает скорость вращения поля.

**Скольжение.** Итак, важнейшее свойство асинхронной машины состоит в том, что при ее работе магнитное поле и ротор вращаются с разными скоростями, не синхронно или асинхронно, что и получило отражение в наименовании этой машины. При анализе работы асинхронных машин удобно пользоваться безразмерной величиной s, называемой скольжением и определяемой отношением разности скоростей вращения магнитного поля $\Omega_0$ и ротора $\Omega$ к скорости вращения поля:

$$s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = \frac{\Omega_s}{\Omega_0}, \qquad (17.8)$$

где $\Omega_0 - \Omega = \Omega_s$ – скорость вращения поля относительно ротора, называемая *скоростью скольжения*.

В формуле скорость вращения ротора $\Omega$ – величина алгебраическая. Ее следует считать положительной при вращении ротора в направлении вращения магнитного поля и отрицательной – при встречном вращении поля и ротора.

Зависимость скорости вращения ротора $\Omega$ от скольжения при заданной постоянной скорости вращения магнитного поля $\Omega_0$ графически выражается прямой, построенной на рис. 17.10 в соответствии с формулой $\Omega = \Omega_0(1 - s)$.

Для случая идеального холостого хода ($\Omega_x = \Omega_0$) скольжение $s = 0$; при неподвижном роторе ($\Omega = 0$) скольжение $s = 1$. Режим двигателя ($\Omega < \Omega_0$) характеризуется положительными величинами скольжения, изменяющимися в пределах от единицы до нуля, а режим генератора ($\Omega > \Omega_0$) – отрицательными величинами скольжения. В режиме электромагнитного тормоза скольжение $s > 1$.

Величину скольжения $s$ можно также выразить через линейные скорости $\upsilon_0$ и $\upsilon$ движения поля и ротора относительно статора или через частоты вращения поля $n_0$ и ротора $n$:

$$s = \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0} = \frac{\upsilon_s}{\upsilon_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{n_s}{n_0}, \qquad (17.9)$$

где $\upsilon_s = \upsilon_o - \upsilon$ – линейная скорость скольжения;

$n_s = n_0 - n$ – частота скольжения.

Рис. 17.10. График зависимости угловой скорости вращения ротора от скольжения

## 17.5. Заземления и зануления в трехфазных сетях

При эксплуатации трехфазных сетей необходимо обеспечить соответствующие меры безопасности, исключающие возможность поражения человека электрическим током. Для этого осуществляют надежную изоляцию токоведущих частей электротехнических установок, а также применяют специальные защитные устройства, предотвращающие опасность поражения током при повреждении изоляции или прикосновении к металлическим частям электрических машин и аппаратов, которые в нормальных условиях не находятся под напряжением.

Статистика показывает, что подавляющее большинство травм происходит в случае прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением. В трехфазных сетях низкого напряжения (до 1000 В) величина тока, поражающего человека, зависит от режима нейтрали сети, а также от активной и емкостной проводимостей, существующих между проводами и землей. Необходимо знать, что токи промышленной частоты порядка 0,01–0,015 А опасны для жизни, а токи, превышающие 0,1 А, смертельны.

Электроустановки напряжением до 1000 В работают как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью. В соответствии с Правилами устройств электроустановок (ПУЭ) для сетей напряжением до 1000 В предусматриваются в основном два типа трехфазных цепей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с заземленной нейтралью.

Рассмотрим в качестве примера трехпроводную сеть с изолированной нейтралью и определим, от чего зависит величина тока, поражающего человека, прикоснувшегося к одному из проводов такой сети.

Каждая сеть характеризуется определенной проводимостью изоляции, а также емкостью проводов относительно земли (рис. 17.11). Эти проводимость и емкость условно можно рассматривать как сосредоточенную активную и емкостную нагрузку, соединенную звездой, нейтральной точкой которой служит земля.

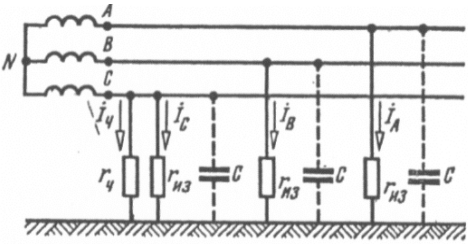



Рис. 17.11. К определению величины тока, проходящего через тело человека при его соприкосновении с одной из фаз трехпроводной сети с изолированной нейтралью

Если пренебречь емкостной проводимостью, сопротивление изоляции каждого из проводов обозначить $r_{из}$, а сопротивление тела человека $r_ч$, то в случае прикосновения человека к одной из фаз сети с изолированной нейтралью ток, проходящий через его тело, определится из формулы (это выражение легко получить, воспользовавшись методом эквивалентного генератора: при размыкании ветви с $r_ч$ $U_x = U_ф$, $z_{вх} = 1/3r_{из}$):

$$I_ч = \frac{U_ф}{r_ч + 1/3r_{из}}. \qquad (17.10)$$

Следовательно, чем больше сопротивление изоляции проводов, тем меньше ток $I_ч$; поэтому важно следить за состоянием изоляции сети.

В аварийном случае, например при коротком замыкании одной из фаз трехпроводной сети на землю, напряжение каждой из двух других фаз относительно земли становится равным линейному. Если при этом человек прикоснется к одной из исправных фаз, то он попадет под линейное напряжение сети, и ток будет заведомо опасным:

$$I_ч = \frac{\sqrt{3U_ф}}{r_ч}. \qquad (17.11)$$

Для предотвращения поражений, вызываемых прикосновением к металлическим частям электрооборудования, оказавшимся под напряжением (например, при пробое изоляции на корпус электродвигателя), наиболее эффективно применение защитных заземлений. Корпуса электротехнических установок посредством шин малого сопротивления (согласно ПУЭ величина сопротивления заземления $r_з$ не должна превышать 4 Ом, т. е. $r_з < r_ч$) соединяются с металлическими трубами или листами, непосредственно соприкасающимися с землей.

Тогда в случае, например, пробоя изоляции одной из фаз статорной обмотки двигателя ток $I_ч$, проходящий через тело человека, прикоснувшегося к корпусу этого двигателя, будет во много раз меньше тока $I_э$ и не будет представлять опасности для жизни.

Следовательно, цель защитного заземления – снизить до безопасного значения напряжение прикосновения.

Кроме защитного заземления, применяется защитное зануление. Защитное зануление используется в четырехпроводных сетях напряжением до 1000 В, работающих с заземленной нейтралью (рис. 17.12).

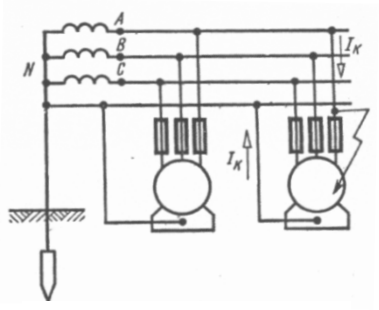


Рис. 17.12. Защитное зануление

Металлические части корпусов электродвигателей и аппаратов всегда соединены посредством стальных полос с нейтральным проводом четырехпроводной сети, нейтральная точка которой заземлена. В случае пробоя на корпус фазный и нейтральный провода оказываются замкнутыми накоротко, и возникающий при этом значительный по величине ток короткого замыкания вызывает перегорание плавких предохранителей или срабатывание

защитного реле. Следовательно, защитное зануление обеспечивает отключение от источника питания электротехнических устройств при повреждении их изоляции.

В процессе работы электропривода необходимо включать и выключать двигатель, изменять скорость вращения и ее направление и т. п., т. е. осуществлять управление электроприводом.

Управление электроприводом производится с помощью аппаратов ручного и автоматического управления.

Аппараты ручного управления служат для нечастого оперативного включения и отключения электрических цепей сравнительно небольшой мощности. К ним относятся ключи, пакетные выключатели, командоаппараты, универсальные переключатели, командоконтроллеры, конечные и путевые выключатели различных модификаций, кнопки, кнопочные станции (блоки из двух и более кнопок) и т. д.

Включение и отключение таких аппаратов осуществляется ручным или механическим способом путем воздействия на рычаги с укрепленными на них подвижными контактами. Все перечисленные аппараты очень просты по устройству и принципу работы.

Рис. 17.13. Автоматический воздушный выключатель

Для нечастого включения и отключения электрической цепи используют также автоматический воздушный выключатель (рис. 17.13). Особенностью автоматического воздушного выключателя является то, что он, помимо контактной системы, снабжен устройством, выполняющим функцию защиты коммутируемой цепи. Таким устройством служит расцепитель – элемент, контролирующий заданный параметр цепи и воздействующий на контактную систему автомата. *Расцепитель* представляет собой механизм с подвижной системой, работа которой обусловливается тепловым или магнитным действием тока.

В зависимости от того, какую защиту должен осуществлять автомат, его расцепитель может быть выполнен как:

1) расцепитель максимального тока (для защиты от токов коротко-

го замыкания) – электромагнит, якорь которого втягивается при токе, превышающем определенное значение (ток установки);

2) тепловой расцепитель (для защиты от токов перегрузки); действие такого расцепителя можно рассмотреть на устройстве теплового реле (рис. 17.14). Основным элементом теплового реле является биметаллическая пластинка *1*, представляющая собой спай двух металлов, с различными коэффициентами удлинения. Биметаллическая пластинка охвачена спиралью *2*, которая является участком защищаемой цепи, т. е. по ней проходит ток. Благодаря тепловому действию тока спираль нагревается, а вместе с ней нагревается и биметаллическая пластинка.

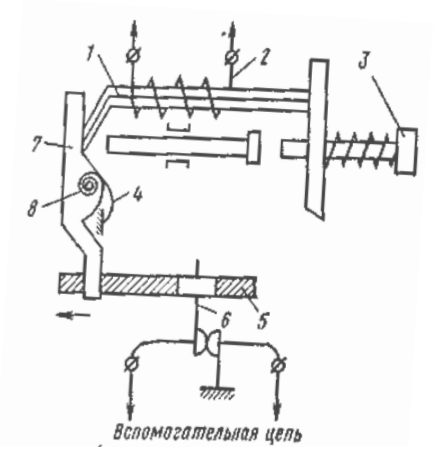


Рис. 17.14. Устройство теплового реле

При нормальном режиме работы приемника ($I = I_н$) нагрев пластинки недостаточен для ее заметной деформации. Если же ток длительно превышает номинальное значение, пластинка от нагревания значительно деформируется и, изгибаясь, поднимается вверх, освобождая рычаг *7*. Последний под действием пружины *4* поворачивается вокруг оси *8* по часовой стрелке и тягой *5* размыкает контакты *6*, разрывая тем самым вспомогательную цепь катушки включающего устройства. Кнопка *3* предназначена для возврата системы реле в исходное положение, после того как охладится спираль и биметаллическая пластинка.

Тепловой расцепитель, выполненный по принципу теплового реле, отключает автомат только при длительных перегрузках: при $I = 1{,}5\ I_н$ он срабатывает примерно через 2 мин, при $I = 3I_н$ – через 35 с; расцепитель не реагирует на значительные, но кратковременные превышения тока в защищаемой цепи.

В том случае, когда цепь необходимо защищать и от кратковременных, но значительных перегрузок, применяют автомат с комбинированным расцепителем (электромагнитный и тепловой).

Существуют также расцепители минимального напряжения (для

предотвращения работы электротехнического устройства при пониженном напряжении). Такой расцепитель представляет собой электромагнит, якорь которого, втягиваясь при заданном значении напряжения, способен преодолеть сопротивление пружины; при понижении или исчезновении напряжения пружина оттягивает якорь, отключая автомат.

## 17.6. Расчет мощности и выбор электродвигателя

Из многочисленных типов двигателей переменного и постоянного тока для привода той или иной производственной машины должен быть выбран такой двигатель, который наиболее полно удовлетворял бы технико-экономическим требованиям. Это значит, что необходимо выбрать двигатель, наиболее простой по управлению, надежный в эксплуатации, имеющий наименьшую стоимость, вес и габариты, а также высокие энергетические показатели.

В сравнении со всеми существующими типами двигателей этим требованиям в наибольшей мере отвечают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Поэтому асинхронные двигатели нашли широкое применение во всех отраслях народного хозяйства для привода различного рода механизмов и машин, не требующих регулирования скорости в процессе работы.

Таким образом, выбирая тип двигателя для регулируемого электропривода малой или средней мощности, необходимо, прежде всего, рассмотреть возможность применения короткозамкнутого асинхронного двигателя с одной «беличьей клеткой», расположенной в круглых или овальных пазах ротора. При этом следует выяснить, насколько полно будут удовлетворены технические требования: допустимое уменьшение скорости при увеличении момента нагрузки, допустимая частота повторных включений, возможность быстрого и надежного пуска и т. д. Если, например, пусковой момент короткозамкнутого асинхронного двигателя с одной «беличьей клеткой» окажется недостаточным для обеспечения требуемого режима пуска, то выбирают двигатель с двойной «беличьей клеткой» или с глубокими пазами на роторе, т. е. двигатель с повышенным пусковым моментом.

В тех случаях, когда короткозамкнутый асинхронный двигатель с «беличьей клеткой», имеющей малое активное сопротивление стержней, не обеспечивает требуемой частоты включений, рекомендуется использовать двигатель с «беличьей клеткой» повышенного сопротивления. Это позволяет уменьшить потери энергии при пуске. В отдель-

ных случаях приходится применять асинхронные двигатели с контактными кольцами. Они сложнее по устройству, имеют большой вес, габариты и стоимость, менее надежны в работе. Поэтому применение асинхронных двигателей с контактными кольцами ограничено в основном теми электроприводами, где по условиям пуска требуется иногда повышенный или, наоборот, ограниченный пусковой момент. Это характерно для подъемно-транспортных механизмов, где по ряду причин требуется ограничение ускорений (пассажирские подъемники, шахтные подъемные установки и др.). Асинхронные двигатели с контактными кольцами, имеющие меньшие потери энергии в обмотках при пуске и торможении, позволяют использовать их в очень напряженных режимах работы с большой частотой включений. Они могут применяться также в тех установках, где требуется регулирование скорости в узких пределах. Однако следует иметь в виду, что при этом уменьшается жесткость механических характеристик и снижается к. п. д. привода.

Для нерегулируемых электроприводов средней и большой мощности, работающих в продолжительном режиме с редкими пусками (преобразовательные установки, компрессоры, мощные насосы, воздуходувки и т. д.), следует использовать синхронные двигатели. Они отличаются более высоким к. п. д., допускают регулирование коэффициента мощности, что имеет большое практическое значение там, где необходимо компенсировать реактивную мощность. Применение синхронных двигателей малой мощности экономически менее целесообразно, так как капитальные затраты не окупаются эксплуатационными преимуществами.

Двигатели постоянного тока независимого возбуждения применяются главным образом там, где по условиям работы требуется глубокое и плавное регулирование скорости, а также в тех случаях, когда необходима работа привода с низкой скоростью. Жесткая механическая характеристика, возможность плавного и глубокого регулирования скорости, а также большая допустимая частота включений позволяют применять двигатели постоянного тока независимого возбуждения (система Г–Д) в таких ответственных электроприводах, как реверсивные прокатные станы, доменные подъемники, лифты высотных зданий, бумагоделательные машины, сложные металлообрабатывающие станки и др.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения широко используются на электрическом транспорте и в подъемно-транспортных механизмах, так как в отличие от других двигателей они

обладают механическими характеристиками переменной жесткости: при больших значениях момента они более жесткие, при малых моментах – мягкие.

Условие максимальной производительности, надежности и экономичности электропривода может быть выполнено только в случае правильного расчета мощности электродвигателя.

Двигатель заниженной мощности не обеспечивает заданной производительности, чрезмерно перегревается, быстро изнашивается и является причиной возникновения аварий и простоев. Двигатель завышенной мощности работает с низким к.п.д., стоимость электрооборудования и эксплуатационных расходов при этом возрастает.

Расчет необходимой мощности двигателя производят на основании ряда технико-экономических требований, но одним из основных условий правильного выбора электродвигателя является его нагрев.

Наиболее уязвимой с точки зрения нагрева является изоляция обмоток двигателя.

Если температура окружающей среды принята ГОСТом равной 40 °С, то превышение температуры изоляции обмоток над температурой окружающей среды допускается в пределах от 65 (для изоляции класса А) до 115 °С (для изоляции класса F), а для некоторых нагревостойких материалов на основе слюды, стекла и керамики – до 140 °С.

Превышение температуры изоляции обмоток сверх установленной ГОСТом недопустимо, так как это ведет к разрушению изоляции и сокращению срока службы двигателей.

При рассмотрении тепловых процессов в двигателе для упрощения задачи полагают, что двигатель является однородным сплошным телом, а теплоемкость и теплоотдача пропорциональны разности температур двигателя и окружающей среды.

В соответствии с этим изменение температуры перегрева $t$ в зависимости от начальной $\tau_{нач}$ и конечной $\tau_{уст}$ температур выражается уравнением:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (17.12)$$

Если же начальное превышение температуры $\tau_{нач} = 0$ при $t = 0$, то уравнение приводится к следующему виду:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \qquad (17.13)$$

На рис. 17.15 изображены кривые нагревания двигателя при различных мощностях нагрузки.

Нагрузке $P_1 = P_н$ соответствует кривая *1*, нагрузке $P_2$ – кривая *2* и т. д. Из рисунка видно, что двигатель может длительно работать без перегрева в том случае, когда развиваемая им мощность не превышает номинальной. Если эта мощность выше номинальной, то время работы двигателя должно быть уменьшено с таким расчетом, чтобы его температура не превышала $\tau_{доп}$ ($t_2$, $t_3$ на рис. 17.15).

Начальная температура перегрева $\tau_{нач}$ изменяет лишь скорость увеличения температуры двигателя, не изменяя характера процесса (рис. 17.16).

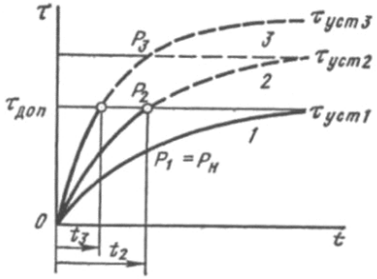



Рис. 17.15. Кривые нагревания двигателя при различных мощностях нагрузки

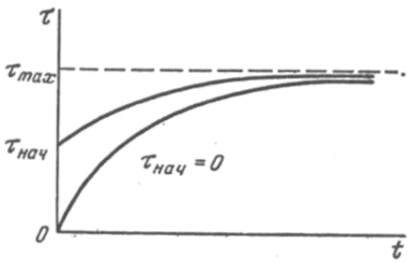



Рис. 17.16. Изменение температуры перегрева двигателя при $\tau_{нач} = 0$ и $\tau_{нач} \neq 0$

В этом случае уравнение температуры перегрева имеет такой вид:

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст})e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (17.14)$$

Разность $\tau_{нач} - \tau_{уст}$ может быть положительной или отрицательной, и температура двигателя будет соответственно расти или убывать (рис. 17.17).

Первому случаю соответствует кривая *1* (рис. 17.17), второму случаю – кривые *2* и *3*. Постоянная времени охлаждения $T_0$ неподвижного двигателя больше постоянной времени нагревания (охлаждения) $T$ вращающегося двигателя. Вообще же постоянная времени двигателя пропорциональна его объему. Кроме того, у вентилируемых машин постоянная времени меньше по сравнению с невентилируемыми машинами тех же габаритов.

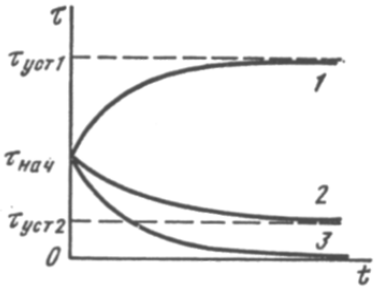



Рис. 17.17. Кривые изменения температуры двигателя при нагревании и охлаждении

## 17.7. Классификация режимов работы электропривода

Исходя из особенностей нагревания и охлаждения двигателя различают три режима работы электропривода: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Под *продолжительным режимом* понимают работу электропривода такой длительности, при которой температура всех устройств, входящих в состав электропривода, достигает установившегося значения. В таком режиме работают электроприводы компрессоров, вентиляторов, воздуходувок, преобразовательных агрегатов и т. п.

Примерные графики работы двигателя в продолжительном и прерывисто – продолжительном режимах показаны на рис. 17.18.

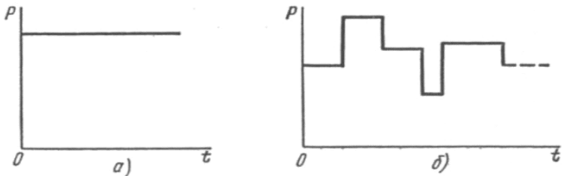



Рис. 17.18. Примерные графики работы двигателя в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой (*а*) и прерывисто-продолжительном режиме с изменяющейся нагрузкой (*б*)

Кратковременный режим работы электропривода характеризуется

такой длительностью, при которой температура всех устройств, входящих в состав электропривода, не достигает установившегося значения во время работы и снижается до температуры окружающей среды во время паузы (например, электроприводы разводных мостов, затворов шлюзов и др.). График нагрузки двигателя кратковременного режима показан на рис. 17.19.

Режим работы электропривода, при котором периоды работы имеют такую длительность и, таким образом, чередуются с паузами такой длительности, что температура всех устройств, входящих в состав электропривода, не достигает установившегося значения ни во время каждого периода работы, ни во время каждой паузы, называют *повторно-кратковременным режимом работы*. Длительность одного рабочего периода и паузы называют *циклом*. Время цикла $t_ц$ не должно превышать 10 мин.

В повторно-кратковременном режиме работают многие механизмы подъемно-транспортных машин, некоторые металлорежущие станки и т. п. Упрощенный график нагрузки двигателя повторно-кратковременного режима показан на рис. 17.20.

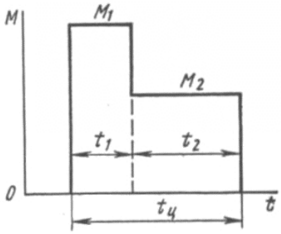



Рис. 17.19. График кратковременного режима работы двигателя

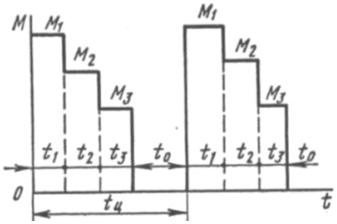



Рис. 17.20. График повторно-кратковременного режима работы двигателя

**Расчет мощности и выбор двигателя для продолжительного режима работы.** Если температура окружающей среды не отличается от принятой ГОСТом, то выбор двигателя для продолжительного режима работы с постоянной нагрузкой сводится к выбору его по каталогу. При этом должно удовлетворяться условие $P_н \geq P$.

Расчет или проверку правильности предварительного выбора мощности двигателя для прерывисто-продолжительного режима работы с переменной нагрузкой производят на основании нагрузочной диаграммы. Пользуясь уравнениями нагревания и охлаждения двигателя,

следует определить температуру максимального перегрева $\tau_{max}$ и сравнить ее с допустимой температурой $\tau_{доп}$. Правильному выбору (при достаточно большом числе циклов $n$, когда $nt_ц > 4T_н$, где $t_ц$ – время цикла работы, а $T_н$ – постоянная времени нагрева двигателя) соответствует условие $\tau_{max} \leq \tau_{доп}$.

Однако определение величины $\tau_{max}$ требует громоздких вычислений, больших затрат времени и поэтому в практике почти не применяется. Более удобным (хотя и менее точным) является метод средних потерь. В основу этого метода положено условие, в силу которого мощность потерь $\Delta p_{ср}$ за цикл работы не должна превышать номинального значения, т. е. $\Delta p_{ср} < \Delta p_н$.

Таким образом, считают, что количество тепла, рассеявшегося в окружающей среде при работе по заданному графику, не больше того количества, которое выделялось бы за то же время работы с постоянной номинальной мощностью. В соответствии с этим, а также с учетом того, что количество тепла $\Delta pdt$ пропорционально потерям мощности, можно записать:

$$\Delta p_н \geq \frac{\Delta p_1 t_1 + \Delta p_2 t_2 + ... + \Delta p_k t_k}{t_ц}. \qquad (17.15)$$

Метод средних потерь применим для всех двигателей переменного и постоянного тока и является наиболее точным по сравнению с методом эквивалентных величин.

Под *эквивалентными величинами* (ток $I_{экв}$, момент $M_{экв}$ и мощность $P_{экв}$) понимают такие их значения, которым соответствуют потери в двигателе при продолжительной нагрузке, равные потерям при работе этого же двигателя по заданному графику с переменной нагрузкой.

Методы эквивалентных величин основаны на методе средних потерь с учетом соответствующих допущений. Так, если считать, что постоянные потери $p_с$ в двигателе не зависят от нагрузки, то можно записать:

$$(p_с + aI_{экв}^2)t_ц = (p_с + aI_1^2)t_1 + (p_с + aI_2^2)t_2 + \ldots + (p_с + aI_к^2)t_k, \qquad (17.16)$$

где $aI_{экв}$ – потери в меди;

$t_1, t_2, \ldots, t_k$ – промежутки времени, в которые ток двигателя соответственно равен $I_1, I_2, ..., I_k$;

$t_1 + t_2 + \ldots + t_k = t_ц$ – время цикла.

Из уравнения можно определить эквивалентный по нагреву ток (в А):

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \mathrm{t}_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_k^2 t_k}{t_1 + t_2 + \ldots + t_k}}. \qquad (17.17)$$

При выборе двигателя по каталогу или при проверке предварительно выбранного двигателя должно соблюдаться условие $I_{\text{экв}} < I_{\text{н}}$.

Метод эквивалентного тока применим для расчета мощности и выбора всех типов двигателей, кроме тех, когда необходимо учитывать изменение потерь в стали и потерь на трение. Этот метод неприменим для короткозамкнутых двигателей с глубокими пазами или с двойной «беличьей клеткой». Это вызвано тем, что сопротивление ротора в пусковых и тормозных режимах значительно изменяется. В таких случаях следует пользоваться методом средних потерь.

Метод эквивалентного момента является производным от метода эквивалентного тока, так как для большинства двигателей момент пропорционален току. Таким образом, этот метод неприменим в тех же случаях, что и метод эквивалентного тока и, кроме того, тогда, когда поток двигателя не остается постоянным (двигатели с последовательным возбуждением, шунтовые двигатели при регулировании скорости путем изменения потока, асинхронные двигатели в пусковых и тормозных режимах).

Эквивалентный по нагреву момент, также как и эквивалентный по нагреву ток, представляет собой среднеквадратичное значение момента нагрузочной диаграммы:

$$\mathrm{M}_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\mathrm{M}_1^2 t_1 + \mathrm{M}_2^2 t_2 + \ldots + \mathrm{M}_k^2 t_k}{t_1 + t_2 + \ldots + t_k}}. \qquad (17.18)$$

Если имеется график $p(t)$, можно воспользоваться аналогичной формулой для эквивалентной мощности, которая справедлива, когда скорость двигателя изменяется незначительно:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_k^2 t_{\mathrm{k}}}{t_1 + t_2 + \ldots + t_k}}. \qquad (17.19)$$

При использовании метода эквивалентных величин для расчета мощности двигателя или проверки его по нагреву необходимо предва-

рительно произвести проверку двигателя по перегрузочной способности и пусковому моменту.

Требование лучшей загрузки и, следовательно, использования двигателя в случаях длительной работы с переменной нагрузкой удовлетворяется при выборе двигателя с номинальным моментом $M_н$, близким к эквивалентному моменту $M_{экв}$. При этом может оказаться, что в некоторые периоды времени двигатель будет нагружен моментами больше номинального, т. е. перегружен. Такие перегрузки допустимы только в пределах перегрузочной способности двигателя.

Под *перегрузочной способностью* двигателя понимают величину коэффициента перегрузки, т. е. отношение максимально допустимого момента к номинальному моменту:

$$k_п = \frac{M_{max}}{M_н}, \qquad (17.20)$$

где $k_п$ – коэффициент перегрузки по моменту;

$M_{max}$ – максимально допустимый момент перегрузки;

$M_н$ – номинальный момент двигателя.

У двигателей постоянного тока коэффициент перегрузки ограничивается в основном условиями коммутации; для двигателей независимого и смешанного возбуждения $I_{max} / I_н = 2 – 2{,}5$; для двигателей последовательного возбуждения $I_{max} / I_н = 2{,}5 – 3$.

Перегрузочная способность асинхронного двигателя ограничивается моментом, который способен развить двигатель при напряжении на фазахего обмотки на 15–20 % ниже номинального:

$$k_п = (0{,}8 \div 0{,}85)\frac{M_{max}}{M_н}. \qquad (17.21)$$

Такое ограничение перегрузочной способности асинхронного двигателя вызвано возможным снижением напряжения питающей сети с учетом того, что $M_{max} \sim U_ф^2$ %.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели, кроме проверки по перегрузочной способности, особенно при кратковременной работе, выбирают по пусковому моменту. Поскольку эти двигатели обладают сравнительно небольшим пусковым моментом, необходимо сравнить начальный статический момент $M_{с.\ нач}$, создаваемый рабочей машиной, и пусковой момент $M_п$ двигателя. Условию нормального пуска соответствует неравенство $M_п > M_{с.\ нач}$.

Для некоторых производственных механизмов, работающих в продолжительном режиме с постоянным моментом сопротивления на валу рабочего органа, имеются приближенные формулы для определения мощностей двигателей для компрессора (в кВт):

$$P = \frac{Q\text{A}}{\eta_{\text{к}}\eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \qquad (17.22)$$

где $Q$ – производительность компрессора, м$^3$/с;

А – работа, затрачиваемая на сжатие 1 м$^3$ воздуха от $1{,}01 \cdot 10^5$ Н/м$^2$ до требуемого давления $P$, Н/м$^2$;

$\eta_{\text{к}}$, $\eta_{\text{п}}$ – соответственно к.п.д. компрессора и передачи для вентилятора:

$$P = \frac{k_{\text{з}} Q\text{H}\gamma}{\eta_{\text{в}}\eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \qquad (17.23)$$

где $k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса (для мощности до 1 кВт $k_{\text{з}} = 2$, для мощности до 2 кВт $k_{\text{з}} = 1{,}5$ и для мощности до 5 кВт $k_{\text{з}} = 1{,}1 – 1{,}5$);

$Q$ – производительность вентилятора, м$^3$/с;

Н – напор (давление), Н/м$^2$;

$\eta_{\text{в}}$, $\eta_{\text{п}}$ – соответственно к.п.д. вентилятора и передачи;

Мощностей двигателя для насоса (в кВт):

$$P = \frac{k_{\text{з}} Q\text{H}\gamma}{\eta_{\text{н}}\eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \qquad (17.24)$$

где $k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса (для мощности до 50 кВт $k_{\text{з}} = 1{,}2$, для мощности от 50 до 350 кВт $k_{\text{з}} = 1{,}5$, для мощности свыше 350 кВт $k_{\text{з}} = 1{,}1$);

$Q$ – производительность насоса, м$^3$/с;

Н – дифференциальный напор, м;

$\gamma$ – удельный вес перекачиваемой жидкости;

$\eta_{\text{н}}$, $\eta_{\text{п}}$ – соответственно к. п. д. насоса и передачи.

Расчет мощности двигателя для работы в повторно-кратковременном режиме производят по тем же формулам, что и для работы в продолжительном режиме. При этом, однако, необходимо учитывать особенности, характеризующие повторно-кратковременный режим.

Частые пуски и остановы ухудшают вентиляцию на участках раз-

гона и торможения двигателя. Это учитывают поправочными коэффициентами, которые выбирают исходя из тех соображений, что для самовентилируемых электродвигателей открытого исполнения теплоотдача в неподвижном состоянии ухудшается примерно в два раза. С учетом этого выражение (например, для эквивалентного тока) будет иметь следующий вид:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{0{,}75 t_1 + t_2 + 0{,}75 t_3}}, \qquad (17.25)$$

где $t_1$ – время разгона двигателя;

$t_2$ – время работы двигателя с установившейся скоростью;

$t_3$ – время торможения двигателя.

Кроме того, повторно-кратковременный режим характеризуется так называемой продолжительностью включения (ПВ %). Под ПВ % понимают отношение суммарного времени рабочих периодов к времени продолжительности цикла:

$$\text{ПВ\%} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}, \qquad (17.26)$$

где $t_1$, $t_2$, $t_3$ – время работы на соответствующих участках нагрузочной диаграммы;

$t_0$ – время паузы;

$t_1 + t_2 + t_3 + t_0 = t_{\text{ц}}$ – время цикла.

Для улучшения экономических показателей электроприводов выпускаются двигатели, специально предназначенные для работы в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 15, 25, 40 и 60 %. Перегрузочная способность указана в каталоге для номинальной мощности с ПВ = 25 %.

Как видно из формулы, увеличение ПВ практически означает уменьшение времени паузы по отношению к суммарному времени цикла, что соответствует тяжелому режиму работы с точки зрения нагрева двигателя.

Двигатель, выбранный для работы с ПВ = 15 %, сможет работать с ПВ = 40 %, но для того, чтобы он не перегревался, мощность нагрузки должна быть соответственно уменьшена.

Пересчет с одной величины ПВ на другую производят по формуле:

$$P_2 = P_1\sqrt{\frac{\text{ПВ}_1}{\text{ПВ}_2}}. \qquad (17.27)$$

Так, например, асинхронный двигатель открытого исполнения мощностью 28 кВт при ПВ = 15 % может без перегрева развивать мощность при ПВ = 40 %:

$$P_2 = 28\sqrt{\frac{15}{40}} = 17{,}1\ \text{кВт}, \qquad (17.28)$$

а при длительной работе – еще меньше:

$$P_2 = 28\sqrt{\frac{15}{100}} = 10{,}86\ \text{кВт}. \qquad (17.29)$$

## 17.8. Релейно-контакторное управление

Различают неавтоматическое (ручное) и автоматическое управление.

При ручном управлении переключения в цепях электродвигателей производят вручную, непосредственно воздействуя на рукоятки аппаратов управления. Подобное управление возможно в нерегулируемых приводах незначительной мощности (электропривод центробежного насоса, вентилятора или других простейших механизмов). В мощных электроприводах ручное управление затруднено, а в некоторых случаях вообще невозможно (объекты управления могут находиться в местах, недоступных для оператора, или на значительном расстоянии).

При автоматическом управлении переключения в цепях электродвигателей производят аппаратами, контакты которых приводятся в действие силой тяги электромагнитов, вспомогательных двигателей гидравлических или других устройств. Роль оператора сводится к воздействию на кнопки управления, что, кроме того, позволяет осуществлять управление на значительном расстоянии от управляемого объекта, т. е. дистанционно.

Двигатели, аппараты управления, вспомогательные электротехнические устройства, соединенные в определенной функциональной связи и последовательности, составляют электроустановку.

Для каждой электроустановки, в том числе и для автоматизирован-

ного электропривода, основными схемами являются принципиальная и монтажная.

Принципиальная (или элементная) схема (рис. 17.21) содержит полный состав элементов устройств, входящих в электроустановку (электропривод), и отражает их взаимосвязь. Такая схема дает, как правило, детальное представление о принципе работы электроустановки.

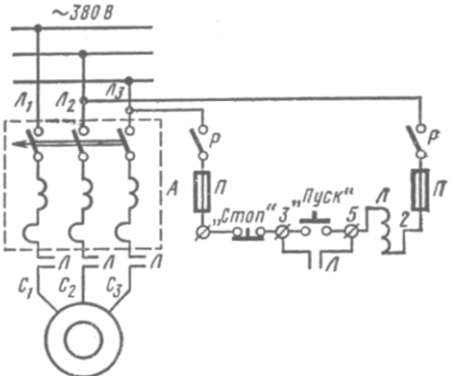



Рис. 17.21. Принципиальная схема пуска асинхронного двигателя

Аппараты управления и защиты, а также электрические машины состоят в основном из однотипных элементов: контактов, катушек, устройств, позволяющих получить выдержки времени, обмоток машин и т. д.

Особенностью принципиальной схемы является то, что элементы отдельных устройств (изделий) разнесены так, как это представляется удобным для отражения принципа действия электроустановки в целом. При этом может оказаться, что условные графические обозначения элементов разных устройств (изделий) расположены рядом и составляют одну цепь (ветвь) схемы. Так, например, на схеме рис. 17.22 силовые контакты, включающие статорную обмотку двигателя, обозначены буквой *Л*. Катушка этого контактора и блокировочный контакт (включенный на зажимы кнопки «Пуск»), входящие в цепь управления, обозначены той же буквой как элементы одного и того же контактора.

Монтажная схема (рис. 17.22) – схема, на которой показаны соединения составных частей установки, разводка проводов и кабелей, их сечения, марки и способ прокладки, а также места присоединения к

разъемам, клеммникам и т. п. Элементы аппаратов на такой схеме вычерчивают в соответствии с их действительным размещением на панели или в шкафу управления.

Чтение схем представляет определенную трудность. Для того чтобы шаг за шагом проследить срабатывание аппаратов, составляющих звенья схемы, их взаимодействия между собой и произведенные ими переключения, прежде всего необходимо хорошо знать условные графические обозначения. Условные обозначения приняты не для аппаратов (или машин) в целом, а для отдельных их элементов. При этом обозначение элементов одного и того же аппарата обязательно должно быть одинаковым и таким же, каким обозначен этот аппарат в схеме главной цепи или его катушка в цепи управления.

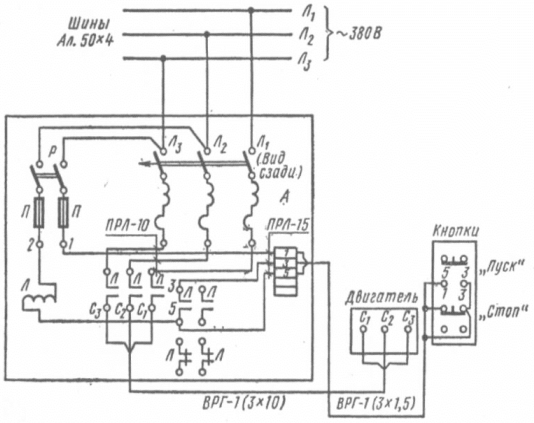



Рис. 17.22. Монтажная схема пуска асинхронного двигателя

Например, если катушка контактора, предназначенного для подключения статорной обмотки асинхронного двигателя, обозначена буквой *Л*, то и силовые, и блокировочные контакты его должны быть обозначены этой же буквой.

Обозначение аппаратов на схемах чаще всего делают по функциональным признакам. Например, *Л* – линейный контактор, т. е. аппарат, соединяющий линии сети с обмоткой машины; *Т* – контактор торможения; *В* – контактор «Вперед»; *РВ* – реле времени; *РУ* – реле ускорения и т. п. Таким образом, прежде чем приступить к рассмотрению работы той или иной схемы, необходимо уяснить назначение каждого из аппаратов, входящих в схему, и расшифровать его обозначение, т. е. разобраться в спецификации машин и аппаратов, составляющих схему.

При этом следует отметить для себя, какие аппараты включаются вручную или механическим путем (от упоров, рычагов или кулачков, не показанных на схеме, т. е. различного рода блокировки, контакты с ручным возвратом и т. д.).

Кроме того, следует помнить, что на принципиальной схеме всегда все контакты реле, контакторов, кнопок управления, путевых выключателей и других аппаратов изображают в отключенном состоянии, т. е. при отсутствии электромагнитного или механического воздействия на кнопки и рычаги этих аппаратов.

После такой обработки схемы можно мысленно осуществить подачу напряжения на цепи управления. В одних случаях этого достаточно, для того чтобы схема считалась подготовленной к принятию команды, после которой в схеме автоматически производится ряд переключений, в других – катушки некоторых аппаратов, например реле напряжения, сразу получают питание, срабатывают и тем самым подготавливают схему к пуску.

В качестве примера рассмотрим простейшую принципиальную схему управления реверсивным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (рис. 17.23), определив предварительно назначение и обозначения аппаратов.

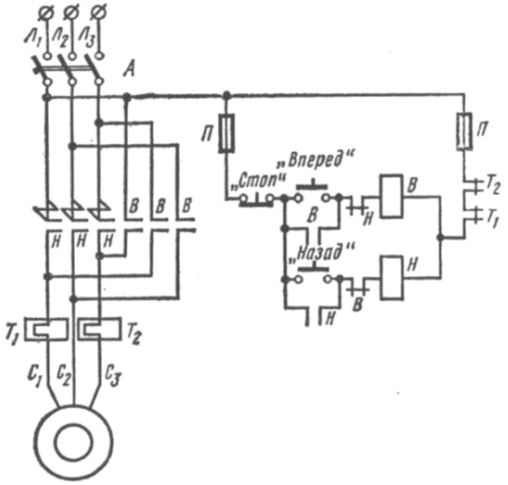



Рис. 17.23. Схему управления реверсивным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

Следует заметить при этом, что элементы главных (силовых) цепей, по которым электроэнергия поступает из сети к обмоткам двигателя, вычерчивают, как правило, более жирными линиями по сравнению с элементами цепей управления – контактами реле, блокировочными контактами, катушками аппаратов и т. д.

В нашем примере для схемы приняты следующие обозначения:

*А* – автоматический выключатель, с помощью которого установка вручную подключается к трехфазной сети переменного тока. Он же защищает установку от больших перегрузок, автоматически отключая ее;

*В* – контактор переменного тока, предназначенный для включения обмотки двигателя в трехфазную цепь переменного тока в условном направлении «Вперед»;

*Н* – такой же контактор для включения двигателя в условном направлении «Назад».

В обоих контакторах, кроме главных контактов, обозначенных также как и катушки (*В* и *Н*), использовано по два блокировочных контакта – один замыкающий и один размыкающий. Замыкающий контакт блокирует соответствующую кнопку, а размыкающий включается последовательно в цепь катушки «чужого» контактора, например контакт *В* в цепь катушки контактора *Н*. Такое включение называют электрической блокировкой, исключающей одновременное включение обоих контакторов во избежание короткого замыкания.

«Вперед», «Назад» – кнопки, предназначенные для ручного замыкания цепи катушки контактора соответственно вперед и назад;

$T_1$ и $T_2$ – размыкающие контакты теплового реле. Нагревательные элементы с теми же обозначениями включены в фазы $C_1$ и $C_3$ обмотки двигателя. При длительной перегрузке двигателя нагревательные элементы нагревают биметаллические пластинки, контакты $T_1$ и $T_2$ разомкнут цепь питания катушек контакторов.

После того как назначение аппаратов и их роль в схеме определены, прочитать схему не представляет труда.

Включением автомата *А* подготавливают схему к пуску. Далее, если будет нажата кнопка «Вперед», цепь катушки контактора *В* получит питание через следующие элементы этой цепи: размыкающий контакт «Стоп», размыкающий контакт *Н* и два размыкающих контакта $T_1$ и $T_2$ (цепь управления защищена предохранителями *П*).

Якорь контактора *В* втянется, замыкающие силовые контакты *В* замкнутся и фазы статорной обмотки двигателя $C_1$, $C_2$, $C_3$ будут соединены соответственно с линейными проводами сети $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$. Ротор

двигателя начнет вращаться в условном направлении «Вперед».

Для изменения направления вращения сначала отключают двигатель от сети путем нажатия на кнопку «Стоп», а затем включают кнопку «Назад». При этом получит питание катушка контактора *Н* и подвижная система контактов подключит обмотку двигателя к линейным проводам в следующем порядке: $C_1 - Л_3$, $C_2 - Л_2$, $C_3 - Л_1$. Ротор двигателя изменит направление вращения на противоположное.

# 18. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ

## 18.1. Классификация и назначение систем телемеханики

Телемеханикой называют область техники, охватывающую теорию и практику устройств передачи информации и управления на расстоянии. В ряде случаев функционально телемеханические системы дополняют системы автоматики, совместно решая общую задачу контроля и управления в инженерных системах.

Следует различать две стадии телемеханизации: телемеханизацию централизованного контроля и телеавтоматизацию управления. В первом случае контроль и управление объектами, находящимися на расстоянии, сосредотачиваются в центральном пункте, однако само управление осуществляется человеком (диспетчерское управление).

Для крупных объектов задачи диспетчерского управления настолько сложны, что возникают задачи автоматизации самого диспетчерского управления. При телеавтоматизации, то есть органическом сочетании автоматизации и телемеханизации, из центрального пункта осуществляется автоматическая координация работ автоматизированных объектов, разделенных расстоянием и являющихся частью общей автоматизированной системы. В частности, телеавтоматизация может применяться совместно с управляющей машиной. В этом случае системы телемеханики вводят в управляющую машину информацию о ходе производственного процесса на отдельных участках и передают этим участкам команды, выработанные управляющей машиной.

Устройства телемеханики, применяемые в инженерных системах, выполняют следующие функции:

телеизмерение (ТИ) – передачу на расстояние значений величин, характеризующих режим работы контролируемых установок;

телеуправление (ТУ) – передачу на расстояние импульсов управления, воздействующих на исполнительные механизмы управляемых установок;

телесигнализацию (ТС) – передачу на расстояние сигналов о состоянии контролируемых объектов или служебных сигналов другого назначения.

Телеизмерение может осуществляться с помощью систем ближнего действия (на расстояниях до 15 км) и систем дальнего действия (на расстояниях до сотен километров, особенно в системах водоснабжения и больших тепловых сетей). В системах ближнего действия, основанных на методе интенсивности, измеряемая величина преобразуется в значение силы тока или напряжения, передаваемое по линии связи.

В системах дальнего действия измеряемая величина передается с помощью электрических импульсов постоянного тока или изменяющейся частоты переменного тока.

В системах ТГВ телеизмерение применяют для передачи значений параметров, характеризующих режим работы отдельных элементов и системы в целом на соответствующий диспетчерский пункт. К таким параметрам относятся: текущее значение температуры и влажности воздуха, давление газа, пара, горячей и холодной воды, расход воды, передаваемые по магистральным сетям; давление, развиваемое насосными агрегатами; давление в основных точках газовой, паровой или водопроводной сети, характеризующее состояние конкретной системы; уровень воды в резервуарах (баках-аккумуляторах), канале систем холодоснабжения и другие параметры.

Телеуправление позволяет с помощью передаваемых импульсов воздействовать на исполнительные механизмы управляемых объектов. Средства ТУ используют для пуска и остановки на расстоянии (из диспетчерского пункта) насосных агрегатов, закрытия, открытия и регулирования степени открытия задвижек, включения и отключения вентиляторов и др.

Возможность осуществления этих операций на расстоянии позволяет диспетчеру без помощи дежурного персонала быстро вводить в действие или выводить из работы соответствующие агрегаты, когда этого требует режим работы системы в условиях нормальной эксплуатации. Кроме того, в аварийных условиях средства ТУ позволяют диспетчеру быстро производить необходимые переключения с целью локализации аварии (например, в газовых сетях).

Телесигнализация используется для автоматической передачи сигналов о состоянии определяющих параметров технологических процессов, насосных агрегатов, задвижек, фильтров и других агрегатов котельных установок, систем теплогазоснабжения. С помощью средств ТС на мнемонической схеме системы, воспроизведенной на щите дис-

петчерского пункта, непрерывно указывается состояние элементов оборудования системы, а также любое изменение положения запорной или регулирующей арматуры либо изменение параметров как в процессе нормальной эксплуатации, так и во время предаварийных или аварийных ситуаций. Это позволяет диспетчеру ориентироваться при производстве оперативных переключений, особенно во время аварии, не прибегая к телефонным переговорам с обслуживающим персоналом.

Важнейшее значение в телемеханике имеют следующие понятия.

Канал связи, с помощью которого осуществляется передача сигналов на расстояния. Кроме проводов и кабелей к каналам связи относят усилители, коммутаторы и фильтры. Канал связи должен обеспечивать наименьшее искажение передаваемых сигналов. Следует различать понятия «канал связи» и «линия связи», поскольку по одной линии связи может быть создано несколько каналов связи для независимой передачи нескольких сообщений.

Сигнал – материальный носитель информации. Существует много методов создания сигналов в системах телемеханики, цель которых уменьшить искажения, возникающие из-за помех и изменения параметров канала связи.

Помехоустойчивость определяет способность системы осуществлять передачу сигналов при наличии помех. Система считается достаточно помехоустойчивой, если расхождение между отправленным и полученным сигналами не превышает заданной величины.

Особое значение имеют точность, быстродействие, пропускная способность и надежность систем телемеханики.

## 18.2. Системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации

### 18.2.1. Системы телеизмерения ближнего и дальнего действия

Системы телеизмерения предназначены для автоматических измерений параметров на расстоянии через каналы связи. Устройства телеизмерений принято называть по методу передачи сигналов через канал связи, то есть по способу модуляции и кодирования, которыми передается значение измеряемого параметра.

В системах ближнего действия для передачи сигналов на расстояния до 15 км применяется амплитудная модуляция. Для уменьшения потери энергии в линии в качестве переносчика информации используется постоянный ток, так как в этом случае на уровне сигнала не бу-

дут сказываться индуктивность и емкость проводов. Такие системы называются системами интенсивности.

В системах дальнего действия используются методы импульсной и частотной передачи сигнала, так как при изменении амплитуды сигнала вследствие затухания в линии связи частота сигнала и такие параметры, как длительность импульса или его задержка, в известных пределах не изменяются.

Рассмотрим две схемы телеизмерения ближнего и дальнего действия.

Телеизмерительная схема интенсивности тока ближнего действия с реостатным датчиком *Д* (рис. 18.1, *а*) основана на использовании перемещения ползунка *П* реостата *R* измерительным прибором *ИП* одновременно со стрелкой на угол $\alpha_и$. Изменение силы тока в линии связи *ЛС*, пропорциональное измеряемой величине, фиксируется вторичным прибором ВП. Для снижения влияния изменения сопротивления линии связи *ЛС* включается балансное сопротивление $R_б$, значительно превышающее сопротивление проводов.

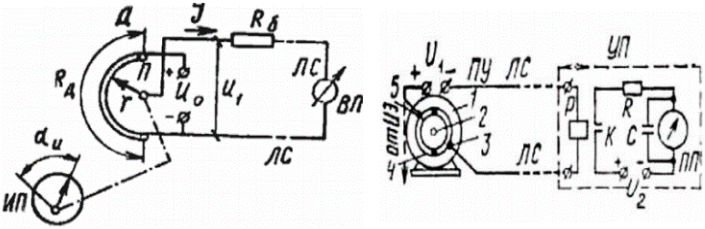



Рис. 18.1. Телеизмерительные схемы: *а* – схема ближнего действия с реостатным датчиком; *б* – время – импульсная схема дальнего действия

Так как для передвижения ползунка *П* требуется относительно большое усилие, эта схема применяется для измерения расхода, давления, уровня и других величин, при контроле которых измерительные приборы развивают значительные вращающие моменты. Время – импульсная схема телеизмерения дальнего действия представлена на рис. 18.1, *б*. Принцип действия этой схемы основан на посылке сигналов в виде импульсов определенной продолжительности или на использовании пауз разной продолжительности между двумя импульсами.

Передающее устройство *ПУ* представляет собой синхронный двигатель *1*, на вал *2* которого насажены два медных полукольца *4*, изолированных между собой. От вала к полукольцам *4* прикасаются две металлические или графитовые щетки: одна из них *3* неподвижна, а дру-

гая *5* имеет кинематическую связь с измерительным прибором *ИЭ*. К щеткам подключается линией связи реле *Р* приемного устройства *УП*, использующего миллиамперметр *ПП* магнитоэлектрической системы.

В процессе работы синхронный двигатель непрерывно вращается с постоянной скоростью. Когда щетка *5* находится в одной плоскости с щеткой *3*, вращающиеся полукольца *4* не могут замкнуть цепь питания линии связи *ЛС* от сети с напряжением $U_1$, то линия связи ЛС обесточена. При отклонении измеряемого параметра щетка *5* перемещается по полукольцу *4* к щетке *3*. В связи с этим в линию связи ЛС посылаются импульсы, продолжительность которых пропорциональна степени перемещения щетки *5* или величине измеряемого параметра.

В приемном устройстве *УП* реле *Р* при замыкании своих контактов *К* посылает к прибору *ПП* импульсы тока или напряжения такой же продолжительности, как и импульсы в линии связи ЛС. Шкала прибора, измеряющая среднее значение импульсов тока, градуируется в единицах измеряемой величины. Сопротивление устройства *УП* ограничивает ток в цепи миллиамперметра, а конденсатор *С* является фильтром.

### 18.2.2. Системы телеуправления и телесигнализации

Основным отличием систем телеуправления от систем дистанционного и местного управления является передача большого количества сигналов по значительно меньшему числу линий связи. Системы телеуправления обычно снабжаются обратной сигнализацией, осуществляемой по той же линии связи и подтверждающей выполнение объектами посылаемых им приказов, а также элементами, защищающими управляемые объекты от выполнения так называемых ложных, случайных приказов. Такие системы называются системами телеуправления и телесигнализации.

Способность систем телеуправления выбирать из большого количества посылаемых сигналов один какой-то сигнал определенного вида, требующийся для управления данным объектом, называется избирательностью.

В многопроводных системах телеуправления несколько различных сигналов посылается по нескольким линиям связи одновременно. Их основным достоинством является небольшой период времени, необходимый на передачу каждого отдельного сигнала, так как сигналы могут передаваться параллельно во времени.

В малопроводных системах телеуправления сигналы посылаются последовательно по времени (поочередно). Основное достоинство этих систем – экономичность вследствие сокращения числа линий связи.

Существующие устройства телеуправления по виду раздельной передачи сигналов или методу избирания и устройству линий связи можно разделить на три группы (рис. 18.2):

1) устройства телеуправления со схемным разделением сигналов или многопроводные устройства;

2) устройства с частотным разделением сигналов;

3) устройства с временным разделением сигналов.

Многопроводные устройства ТУ-ТС (рис. 18.2, *а*) обычно применяют при сравнительно небольших расстояниях между пунктом управления и объектом управления. При наличии $n$ самостоятельных проводов (кроме общего провода питания) по многопроводной системе можно передать $N$ сигналов:

$$N = Kn, \tag{18.1}$$

где К – число импульсных признаков; обычно К = 2…4.

В многопроводных устройствах передача всех импульсов может происходить одновременно, ибо для каждого импульса используется отдельная электрическая цепь. Для разделения импульсов управления и сигнализации применяется амплитудный признак, при котором сила тока управления в несколько раз превышает силу тока сигнализации.

Малопроводные устройства ТУ-ТС с частотным разделением сигналов (рис. 18.2, *б*) обеспечивают передачу различных сигналов по одной линии связи за счет использования посылок тока разной частоты. В передающей части этих устройств имеется генератор синусоидальных колебаний разной частоты; в приемной части сигналы разделяются с помощью полосовых фильтров. Иногда для увеличения числа передаваемых сигналов вводят передачу каждого сигнала двумя частотами с соответствующей их комбинацией.

Малопроводные устройства ТУ-ТС с временным разделением сигналов (рис. 18.2, *в*) осуществляют передачу сигналов по одной линии связи в виде поочередной посылки импульсов с помощью распределителей. Два синхронно работающих распределителя $P_1$ и $P_2$ одновременно подключают линию связи к соответствующим управляющим и управляемым элементам схемы.

В качестве распределителей в системах телеуправления используются переключатели, приводимые в действие электродвигателями,

электромагнитные шаговые распределители, релейные, катодные и бесконтактные переключатели.

Шаговые распределители широко применяются в системах телеуправления, так как они просты по устройству и имеют небольшую стоимость. Недостатками их являются относительно невысокая скорость переключения и наличие вращающихся частей.

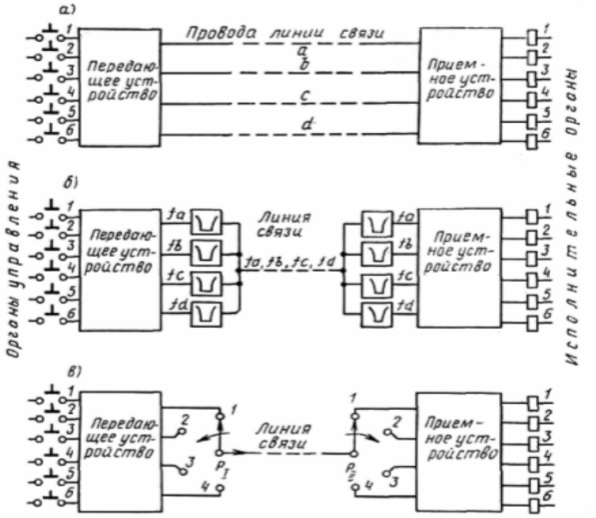



Рис. 18.2. Принципиальные схемы устройств телеуправления:
*а* – многопроводное устройство с разделением сигналов по электрическим цепям;
*б* и *в* – малопроводне устройства с частотным и временным разделением сигналов

В настоящее время применяют более совершенные бесконтактные переключатели, которые представляют собой цепочку бесконтактных элементов (например, триггерных ячеек), последовательно переключающихся при поступлении очередного импульса.

### 18.2.3. Принципы построения управляющих вычислительных комплексов

Управление является необходимой функцией большинства технологических процессов, в результате которых из сырья под действием энергии получается целевой продукт. На ранних стадиях развития производства работник, исходя из своего опыта, принимал решения по

управлению и регулировал подачу сырья и энергии. Он был замыкающим звеном контура управления. По мере усложнения технологических процессов работник оказывался все менее способным справиться с задачей управления.

Управляющий вычислительный комплекс имеет два принципиальных отличия от универсальных ЭВМ. Во-первых, он через датчики и регулирующие органы осуществляет непосредственную связь с объектом управления. Во-вторых, УВК должен своевременно откликаться на события, происходящие в объекте управления, с которым он взаимодействует, работать в одном темпе с объектом управления, то есть в реальном времени. Реальное время – понятие относительное и зависит от темпа протекающих процессов.

Комплекс взаимодействует с внешней средой через устройства связи с объектом (УСО) – устройства аналогового и цифрового ввода и вывода (рис. 18.3).

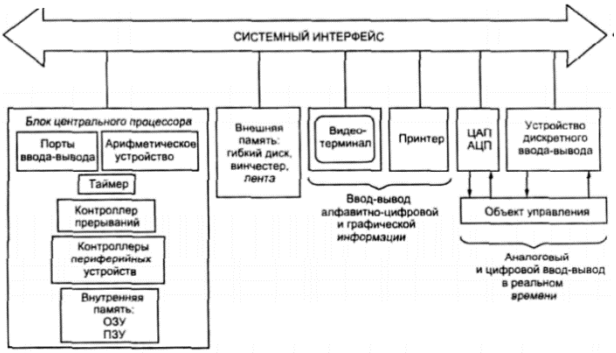



Рис. 18.3. Структурная схема УВК

Физические величины, отображающие протекание технологического процесса (например, его температура), носят преимущественно аналоговый характер. Аналоговый сигнал для передачи в ЭВМ должен быть преобразован в цифровую форму. Преобразование аналоговых величин в цифровые величины осуществляется устройством аналогового ввода.

Поскольку уровни сигналов датчиков, как правило, не соответствуют требованиям преобразователя, устройства аналогового ввода дополняются обычно средствами нормирования сигнала, в качестве которых используются аттенюаторы, фильтры и т. д. Для поочередного подключения входных сигналов к АЦП

используется мультиплексор. Исполнительные устройства, управляющие технологическим процессом, являются, как правило, аналоговыми.

Информация о технологическом процессе может быть представлена не только аналоговыми сигналами, но также сигналами, принимающими дискретные значения. В некоторых технологических процессах используются датчики импульсов. Электрический импульс, регистрируемый счетчиком, может указывать на какое-либо событие или являться известной мерой какой-либо величины. Может также использоваться дискретный сигнал, соответствующий состоянию контактов включено – выключено (состояние двигателя, реле и т. д.) или в пределах – вне пределов, отражаемому разрядом входного регистра.

Основная функция устройства дискретного ввода – регистрация или подсчет двоичных сигналов, возникающих в технологическом процессе. Схемы нормализации сигнала преобразуют входные сигналы, представленные в виде тока или положения переключателя, в сигналы напряжения и содержат помехозащитную пороговую схему, выходное напряжение которой соответствует логической единице, если входное напряжение превышает некоторый порог. Устройство управления обеспечивает связь с ЦП и формирование внутренних управляющих сигналов. В ряде случаев управление технологическим процессом требует наличия как аналоговых, так и цифровых выходов. Некоторые исполнительные механизмы, например шаговый двигатель, управляются не аналоговой электрической величиной, а электрическими импульсами. При этом устройство вывода вырабатывает последовательность управляющих электрических импульсов, количество и параметры которых задаются программой УВК.

Работа в реальном времени предполагает использование времени как параметра управления процессом. Управляющие воздействия должны быть выданы через определенное время после появления каких-либо событий в технологическом процессе. Для реализации функций, связанных с отсчетом времени, используются или программируемый таймер, или «часы реального времени», показания которых определяют моменты времени для выполнения управляющих воздействий.

На рис. 18.4 приведена структурная схема включения УВК в замкну-тый контур управления технологическим процессом. Управление осуществляется на основе математической модели технологического процесса, которая разрабатывается в результате всестороннего изучения поведения процесса и его реакции на управляющие воздействия. Модель процесса служит основой для разработки алгоритма управления – процедуры расчета управляющих воздействий.

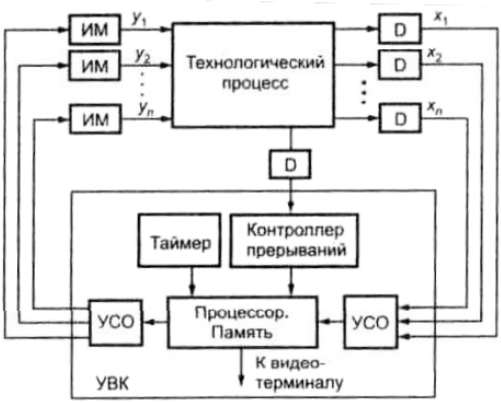



Рис. 18.4. УВК в контуре управления технологическим процессом: $x_1 \ldots x_n$ параметры процесса; $y_1 \ldots y_n$ – управляющие воздействия; $D$ – датчики, ИМ – исполнительные механизмы

В централизованных системах управления функции сбора, обработки и представления технологической информации выполнялись ЭВМ (например, микроЭВМ семейства СМ18ХХ) с соответствующим набором модулей УСО. Это требовало большого числа кабельных связей между устройствами сбора и обработки информации, с одной стороны, и исполнительными устройствами – с другой. Длина каждого канала в этом случае могласоставлять десятки и сотни метров.

Распределенная система управления предполагает использование на нижнем уровне управления интеллектуальных программируемых промышленных контроллеров(ПК) или, согласно международной терминологии, программируемых логических контроллеров (ПЛК, PLC), реализующих функции сбора, а также логической и

арифметической обработки информации в непосредственной близости от объекта управления и контроля.

Таким образом, при использовании в распределенных системах управления интеллектуальных ПК появляется возможность перераспределения функций обработки информации и управления между нижним (ПК) и верхним (УВК или ПЭВМ) уровнями управления. При этом повышается суммарная производительность системы по сравнению с централизованной за счет распараллеливания функций обработки информации между ПК и УВК, что может, например, привести к сокращению времени реакции на события.

Базовые функции промышленного контроллера показаны на рис. 18.5.

Рис. 18.5. Базовые функции промышленного контроллера

Промышленные контроллеры являются массовой продукцией управляющей вычислительной техники, при этом с развитием производства их номенклатура постоянно растет, а применение расширяется.

## 18.3. Требования мелиоративных систем к устройствам телемеханики

Большинство объектов мелиоративных систем расположены в одиночку и лишь небольшая их часть – группами, по 2–5.

1. Телемеханические системы для обслуживания многих таким образом расположенных объектов, т. е. когда количество исполнительных пунктов (ИП) намного больше количества объектов на каждом ИП, называются *системами с рассредоточенными объектами*. Методы и технические средства телемеханизации для них имеют свою специфику.

2. По технико-экономическим соображениям для мелиоративных систем целесообразно применять комплексные системы телемеханики, где по одной линии связи выполняются все функции диспетчерского управления, а именно: ТУ – двух- и многопозиционными объектами, ТС, ТР, ТИ и телефонная связь. Как известно, телемеханические системы состоят из трех основных частей: устройств диспетчерского пункта (ДП), устройств ИП и линий связи. Линия связи является наиболее дорогостоящей частью; стоимость линейных сооружений при длине линий связи, начиная с 50 км, достигает 50 % и более общих капитальных затрат на телемеханизацию в целом. Комплексные системы позволяют осуществить телемеханизацию мелиоративных систем без дополнительных затрат на сооружение дорогих каналов связи. В этом случае используется существующая линия телефонной связи, на которой в настоящее время базируется диспетчеризация. Необходимо лишь при строительстве линии связи выбрать ее трассу и тип связи с учетом использования этой линии как для телефонной связи, так и для телемеханики.

Возможность применения комплексной системы телемеханики объясняется тем, что процессы в мелиоративных системах протекают сравнительно медленно и управление объектами осуществляется редко. Медленное протекание процессов позволяет также проводить телеизмерение не непрерывно, а с большими интервалами. Таким образом, режим работы мелиоративных систем допускает последовательное (во времени) использование одной линии связи для выполнения различных функций.

3. Большое количество объектов учета и контроля исключает применение непрерывного телеизмерения, так как в этом случае для каждого объекта необходимо иметь отдельный канал связи. Учитывая, что в мелиоративных системах скорость изменения контролируемых параметров невелика, целесообразно применить телеизмерение по вызову, при котором пообъектная аппаратура телеизмерения подключается к одному общему каналу связи по мере необходимости.

Наряду с телеизмерением по вызову должно также обеспечиваться циклическое телеизмерение, при котором производится последова-

тельная передача значений всех контролируемых параметров. Циклическое телеизмерение должно осуществляться через определенные интервалы времени автоматически, без вмешательства диспетчера. Следует обеспечить также и автоматическую сигнализацию отклонения контролируемых параметров от заданных значений. В этом случае при возникновении отклонения циклическое телеизмерение прерывается с одновременной сигнализацией диспетчеру о направлении расхождения.

Дальнейшее циклическое телеизмерение производится после квитирования диспетчером сигнала отклонения. Такая автоматизация системы контроля освобождает диспетчера от постоянного наблюдения за контролируемыми параметрами. Приемная телеизмерительная аппаратура может, в крайнем случае, ограничиваться одним прибором, градуированным в процентах. Наиболее целесообразно цифровое воспроизведение контролируемых параметров. Кроме цифрового визуального воспроизведения, должна применяться цифровая регистрация показаний с помощью печатающего устройства. При большом количестве объектов цифровая регистрация – наиболее оперативная форма контроля. Кроме того, как указывалось, для оросительных систем централизованный учет водораспределения является средством, обеспечивающим введение хозрасчета. В этом случае цифровое воспроизведение дает необходимую объективность отсчета и может быть основанием для финансовых расчетов с водопользователем.

4. Система телемеханики должна работать без местных источников энергии. Такая работа более надежна и независима. В момент аварии на объекте и отключения местного источника энергии получение информации о состоянии объекта является особенно важным.

Это требование, справедливое для телемеханических устройств, обслуживающих любой технологический процесс, для мелиоративных систем является специфическим по следующим причинам. Как указывалось, первоочередным этапом автоматизации, особенно на действующих мелиоративных системах, является телеконтроль, при котором управление объектами выполняется на местах вручную, где, как правило, отсутствует электроэнергия. При этих обстоятельствах необходимо осуществление телеконтроля без местных источников энергии.

5. По мере оснащения объектов механизированными и электрифицированными приводами система телеконтроля должна без существенных изменений дополняться аппаратурой управления, превращаясь в комплексную систему телемеханики.

6. При разработке комплексной системы телемеханики следует

стремиться к тому, чтобы количество передаваемых телемеханических сигналов было минимальным. При этом участие наименее надежного звена системы телемеханики – линии связи – сводится к минимуму, а надежность системы в целом повышается.

В большей степени это может быть достигнуто при совместной разработке устройств местной автоматики и телемеханики, причем первым устройствам отдается предпочтение перед вторыми. По этой причине многообъектные сооружения (плотины, вододелительные узлы, некоторые насосные станции и др.) принимаются одиночными объектами телемеханизации. С диспетчерского пункта для многообъектного сооружения в целом передается одна команда телеуправления, а затем местная автоматика по заданной программе обеспечивает требуемую последовательность работы отдельных механизмов и сооружений.

7. Большинство объектов мелиоративных систем, которые при телемеханизации будут работать без обслуживающего персонала, расположены на открытом воздухе, в условиях высокой температуры, влажности и загрязненности.

Поэтому к аппаратуре телемеханики, установленной на таких объектах, предъявляются требования высокой надежности и эксплуатационной неприхотливости.

Одновременно с этим наличие большого числа сравнительно мелких объектов обусловливает необходимость простоты и дешевизны аппаратуры телемеханики. Обычно условия высокой надежности и дешевизны противоречивы. Конструирование подобной аппаратуры требует изыскания оптимального соотношения этих требований.

8. Аппаратура телемеханики должна надежно работать в металлических шкафах наружной установки или в необслуживаемых, неотапливаемых помещениях.

Кроме того, аппаратура должна допускать консервацию на зимний период, в течение которого мелиоративная система обычно бездействует.

9. Условия эксплуатации мелиоративных систем не позволяют проводить ремонт аппаратуры в местах ее установки. Поэтому она должна конструироваться по блочному принципу, допускающему замену поврежденного узла и его последующий ремонт в централизованном порядке.

10. При конструировании унифицированной телемеханической системы необходимо определить оптимальную дальность ее действия. Очевидно, что с увеличением предельной дальности увеличивается

количество объектов, обеспеченных этой системой, которая одновременно усложняется и удорожается.

Рассмотрение этого вопроса для оросительных систем показало (рис. 18.6), что системы телемеханики с радиусом действия 75 км могут быть применены на 93 % всех каналов.

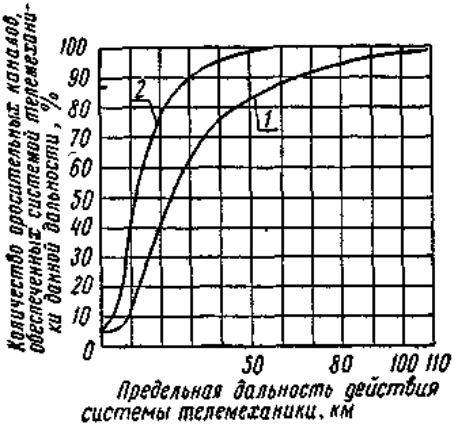



Рис. 18.6. Кривые обеспеченности каналов системами телемеханики различной дальности действия: *1* – ДП расположен в голове канала; *2* – ДП расположен в середине канала

Перечисленные специфические требования предъявляются к системам телемеханики для комплексной автоматизации. Нередко теле механизируются отдельные группы объектов: группы насосных станций, кусты водозаборных скважин и др. В этих случаях определяющими факторами для выбора системы телемеханики являются специфические требования данной группы объектов.

## 18.4. Объемы телемеханизации

Несмотря на большое разнообразие объектов, участвующих в процессе водоподачи и водораспределения, а также на различную их сложность, в большинстве случаев можно унифицировать объемы телемеханизации.

Такая унификация, облегчающая конструирование телемеханической аппаратуры, стала возможной благодаря применению специальных устройств местной автоматики, описанных в третьем разделе.

Для объектов линейного водораспределения многопозиционное те-

леуправление и телерегулирование осуществляются идентично – в виде передачи уставки механизму отработки задания или регулятору. Телеуправление сооружениями, в состав которых входит несколько затворов, может не отличаться от телеуправления одиночными затворами. Очередность включения затворов и программа их работы осуществляются местным устройством – блоком выбора очередности.

Современные осушительные насосные станции автоматизированы, их работа протекает без участия персонала. Импульсы на пуск и остановку агрегатов подаются датчиками уровня. Учитывая, что работа подобных станций обеспечивается местной автоматикой, объем их телемеханизации ограничивается либо одной телесигнализацией, либо телеконтролем (телесигнализация и телеизмерение).

Нередко на осушительных системах сооружается много насосных станций сравнительно небольшой мощности. На некоторых осушительных системах расположены кустами 68 насосных станций с расстоянием между ними 4–5 км и мощностью насосных агрегатов 10–160 кВт.

В других случаях сооружаются более крупные осушительные насосные станции с почти непрерывным круглогодичным режимом работы (перекаченные на водохранилищах, для защиты от подтопления и др.). Исходя из степени ответственности насосных станций объем их телемеханизации дифференцируется следующим образом:

1. Для насосных станций небольшой мощности и периодического действия представляется возможным ограничиться как минимум двумя сигналами с каждой станции: одним объединенным – о неисправности (предупредительный) и другим – сигналом аварийного состояния на насосной станции. Последующая расшифровка характера аварии осуществляется на месте;

2. Для более ответственных станций с непрерывной работой агрегатов осуществляют поагрегатную телесигнализацию, а иногда и сигнализацию, характеризующую работу ряда вспомогательных устройств: дренажной системы, сороудерживающих решеток и др.

При этом на станциях небольшой мощности и периодического действия телеизмерение может не предусматриваться. Для более ответственных станций целесообразно принять телеизмерение по вызову, уровня воды в верхнем и нижнем бьефах насосной станции, расхода воды в напорных трубопроводах и перепада уровней на решетках. Телеизмерение вышеуказанных технологических параметров позволяет контролировать техническое состояние каждого из агрегатов, так как по данным измерений определяется рабочая точка насоса на кривой $Q$–$H$.

Для насосных станций, также как и для объектов линейного водораспределения, должна быть предусмотрена возможность переключения по мере необходимости линии телемеханики на телефонную связь. Раздельных цепей телемеханики и телефонной связи сооружать не следует, так как насосные станции без постоянного обслуживающего персонала нуждаются в телефонной связи эпизодически, преимущественно во время посещения станции с целью ревизии или ремонта.

В отличие от осушительных оросительные насосные станции, как правило, требуют телеуправления. При этом на полуавтоматических станциях каждый из основных насосных агрегатов имеет независимое телеуправление, а на насосных станциях программного действия вся станция в целом управляется одним командным импульсом, по получении которого насосные агрегаты включаются по заданной программе аппаратурой местной автоматики.

Кроме телеуправления основными насосными агрегатами, осуществляется также телеуправление водозаборными сооружениями вододелительного узла насосной станции. В противном случае было бы необходимо на насосных станциях сохранить обслуживающий персонал для управления вододелением.

Объем телесигнализации должен обеспечить диспетчерскому персоналу сведения о состоянии оборудования насосной станции.

Минимальное количество сигналов, равное двум, как и для осушительных станций, может быть допущено для оросительных насосных станций небольшой мощности программного управления.

Для полуавтоматических станций рекомендуется сигнализация поагрегатного состояния насосных агрегатов и других устройств станции согласно перечню.

При наличии свободной емкости объем телесигнализации может быть увеличен. Одновременно с этим взамен индивидуальных часто предусматривают общие сигналы с насосной станции: общий сигнал аварийного отключения, общий сигнал неисправности и др.

Объем телеизмерения должен обеспечить диспетчеру оперативный контроль работы каждого из насосных агрегатов, а также станции в целом. С этой целью рекомендуется телеизмерение следующих технологических параметров:

- уровня воды в нижнем бьефе насосной станции;
- уровня воды в верхнем бьефе;
- расхода воды в напорных трубопроводах;
- перепада уровней на сетках.

Телеизмерение суммарного расхода не требуется. Счетчики сум-

марного расхода устанавливаются на станции, и их показания снимаются при посещении персоналом станции по заданном графику.

В пределах одной насосной станции телеизмерение может быть осуществлено по вызову, циклически – с возможностью прервать в любом месте цикла процесс телеизмерения. Для измерения различных технологических параметров, поступающих как с одной, так и с группы насосных станций, может применяться один общий прибор со шкалой, градуированной в процентах.

Для групп оросительных насосных станций также предполагается применение одной линии связи, по которой осуществляются ТУ, ТС, ТИ и телефонная связь.

# 19. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

## 19.1. Особенности электроснабжения

Характерной особенностью электроснабжения мелиоративных систем является низкий коэффициент использования установленной мощности источников энергии. При централизованном электроснабжении прокладываемая вдоль канала линия электропередачи также имеет очень низкий коэффициент использования. Объясняется это тем, что изменение положения затворов происходит редко. При неблагоприятных обстоятельствах можно принять, что маневрирование затворами с переводом их в крайние положения производится 2–3 раза в сутки. При более благоприятных условиях, когда, например, применяются затворы-автоматы, строго выдерживается график водопотребления и на системе осуществляются круглосуточные поливы, изменение положения затворов может производиться 1–2 раза в декаду и реже.

Особенностью централизованного электроснабжения является также незначительная величина удельной линейной нагрузки (кВА/км).

Поэтому электроснабжение потребителей линейного водораспределения является специфической задачей при передаче малой мощности на большие расстояния. В этом случае потеря электроэнергии существенной роли не играет. Наиболее важным фактором является увеличение допустимой длины линии при минимальных капитальных затратах на ее сооружение.

Местные источники энергии также имеют свои особенности. Они обычно маломощны и, как правило, работают около 20 мин в сутки. Такие источники должны быть экономичны, надежны в эксплуатации и не требовать систематического ухода.

## 19.2. Централизованное электроснабжение

Электрический привод и передача электрической энергии на большие расстояния обеспечивают необходимую надежность эксплуатации. Централизованными источниками электроснабжения обычно служат подстанции энергосистем, а распределение энергии осуществляется при помощи линий электропередач.

Во всех случаях, когда это возможно, целесообразно сооружать линию электропередачи для питания энергией как потребителей оросительной системы, так и других потребителей, лежащих в зоне влияния сооружаемой линии. Создание таких объединенных линий носит индивидуальный характер и каждый раз решается в зависимости от конкретных условий. Мы рассматриваем случаи централизованного электроснабжения, предназначенного специально для обеспечения энергией объектов оросительных систем в связи с их комплексной автоматизацией.

Для таких объектов линии электроснабжения, как правило, сооружаются по радиально-лучевой схеме с односторонним питанием потребителей. Распределенные вдоль линии потребители подключаются к ней при помощи понизительных трансформаторов. Предельная длина питающей магистрали ограничивается допустимой потерей напряжения. На каналах большой протяженности может быть использовано несколько источников электроснабжения, расположенных в районе трассы канала. В этом случае общая предельная длина линии увеличивается в соответствии с количеством используемых источников и их расположением. Увеличение предельных длин питающих фидеров достигается не только за счет использования нескольких источников питания или соответствующего выбора материала и сечения проводов, но и за счет следующих специальных мер:

– допускается повышенный процент потери напряжения в линии. Для этого понизительные трансформаторы, устанавливаемые у потребителей, выполняются с секционированными обмотками, позволяющими иметь у потребителей номинальное напряжение независимо от места их включения в линию;

– в тех случаях, когда нагрузка потребителей соизмерима с суммарными потерями холостого хода присоединенных к линии трансформаторов, последние нормально отключены от линии и подключаются к ней лишь на время работы потребителя.

Изложенные мероприятия позволяют для большинства распространенных длин оросительных каналов и количества потребителей на них

осуществить электроснабжение напряжением либо 6–1,0 кВ, либо до 380/220 В. Основанием для выбора варианта служит линейная удельная нагрузка, зависящая от мощности электропривода подъемных механизмов затворов, их количества и расстояний между ними. Существуют также и другие способы увеличения предельных длин линий при передаче малых мощностей на большие расстояния, в частности метод продольной компенсации потери напряжения в линии.

## 19.3. Система электроснабжения напряжением 6–10 кВ

Для случаев, когда электроснабжение является единственным источником энергии, электрические нагрузки складываются главным образом из силовой нагрузки приводов подъемных механизмов, коммунально-бытовой нагрузки (жилых домов обслуживающего персонала), служебных и коммунальных помещений линейных участков оросительной системы, а также нагрузки управления.

Расчетная силовая нагрузка варианта электроснабжения напряжением 6–10 кВ определяется мощностью электропривода подъемного механизма затвора. Расчет нагрузок производят исходя из средней мощности привода единичного затвора, равной 1 кВт. Потребляемая мощность ($P_п$) такого электродвигателя при номинальной нагрузке определяется характеристикой двигателя.

Значения рекомендуемых коэффициентов одновременности, в зависимости от общего количества затворов, приведены в табл. 19.1.

Таблица 19.1. **Рекомендуемые коэффициенты одновременности для подъемных механизмов затворов**

| Общее количество гидротехнических сооружений канала | Количество одновременно работающих затворов | Коэффициент одновременности | Примечание |
|---|---|---|---|
| 6 | 3 | 0,5 | При числе гидротехнических сооружений более 100 коэффициент одновременности сохраняется неизменным и равным 0,15 |
| 8 | 4 | 0,5 | |
| 10 | 4 | 0,4 | |
| 12 | 5 | 0,4 | |
| 15 | 6 | 0,4 | |
| 20 | 6 | 0,3 | |
| 25 | 7 | 0,28 | |
| 30 | 7 | 0,25 | |
| 50 | 10 | 0,2 | |
| 100 и более | 15 | 0,15 | |

Количество жилых домов обслуживающего персонала вдоль канала определяют исходя из расчета, что линейный техник обслуживает 12–

15 км канала. Для одноквартирного дома линейного техника установленная мощность осветительной нагрузки принимается равной 500 Вт, а двух электробытовых приборов – 1200 Вт.

Коэффициент одновременности для коммунальной нагрузки принимается равным 0,7.

Для осмотра и выполнения безотлагательного ремонта в темное время суток одновременно только на одном сооружении принимается дополнительная мощность 500 Вт. Нагрузка устройств управления относительно мала и специально не учитывается.

В табл. 19.2 на основании указанных нагрузок приведены расчетные линейные нагрузки (в кВА/км) линии электропередачи вдоль каналов различной протяженности. Обычно расчетная линейная нагрузка не превышает 1,0–1,2 кВА/км; с увеличением количества сооружений она, как правило, снижается.

Таблица 19.2. **Расчетные линейные нагрузки (без учета потерь мощности в трансформаторах**

| Общее количество сооружений | Расстояние между сооружениями, км | Расчетная длина канала, км | Расчетная нагрузка | | | Общая расчетная нагрузка, кВА | Линейная нагрузка, кВА/км |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | силовая | коммунальная | ремонтное освещение | | |
| 6 | 1 | 6 | 5,4 | 1,2 | 0,5 | 7,1 | 1,180 |
| | 2 | 12 | 5,4 | 1,2 | 0,5 | 7,1 | 0,592 |
| | 3 | 18 | 5,4 | 1,2 | 0,5 | 7,1 | 0,394 |
| | 4 | 24 | 5,4 | 2,4 | 0,5 | 8,3 | 0,346 |
| | 5 | 30 | 5,4 | 2,4 | 0,5 | 8,3 | 0,276 |
| | 6 | 36 | 5,4 | 2,4 | 0,5 | 8,3 | 0,230 |
| 10 | 1 | 10 | 7,2 | 1,2 | 0,5 | 8,9 | 0,890 |
| | 2 | 20 | 7,2 | 2,4 | 0,5 | 10,1 | 0,507 |
| | 3 | 30 | 7,2 | 2,4 | 0,5 | 10,1 | 0,337 |
| | 4 | 40 | 7,2 | 3,6 | 0,5 | 11,3 | 0,282 |
| | 5 | 50 | 7,2 | 3,6 | 0,5 | 11,3 | 0,226 |
| | 6 | 60 | 7,2 | 4,8 | 0,5 | 12,5 | 0,209 |
| 20 | 1 | 20 | 10,8 | 2,4 | 0,5 | 13,7 | 0,684 |
| | 2 | 40 | 10,8 | 3,6 | 0,5 | 14,9 | 0,372 |
| | 3 | 60 | 10,8 | 4,8 | 0,5 | 16,1 | 0,269 |
| | 4 | 80 | 10,8 | 6,0 | 0,5 | 17,3 | 0,216 |
| | 5 | 100 | 10,8 | 8,4 | 0,5 | 19,7 | 0,197 |
| | 6 | 120 | 10,8 | 9,6 | 0,5 | 20,9 | 0,174 |
| 40 | 1 | 40 | 18 | 3,6 | 0,5 | 22,1 | 0,553 |
| | 2 | 80 | 18 | 6,0 | 0,5 | 24,5 | 0,307 |
| | 3 | 120 | 18 | 9,6 | 0,5 | 28,1 | 0,234 |
| | 4 | 160 | 18 | 14,4 | 0,5 | 32,9 | 0,206 |
| 60 | 0,8 | 48 | 21,6 | 3,6 | 0,5 | 25,7 | 0,535 |
| | 1,6 | 96 | 21,6 | 8,4 | 0,5 | 30,5 | 0,318 |

Линейные нагрузки даны без учета потерь в трансформаторах и емкостной нагрузки линии, которые должны быть учтены при расчете потерь напряжения в линии.

## 19.4. Резервирование электроснабжения

Согласно Правилам устройства электротехнических установок, потребители мелиоративных систем в основном относятся к потребителям 3-й категории, так как временное прекращение их электроснабжения не связано с существенными нарушениями режима работы.

Кроме того, электрический привод подъемных механизмов обычно резервируется ручным приводом. Поэтому, как правило, основным вариантом схем электроснабжения является одностороннее питание по одиночной линии электропередачи.

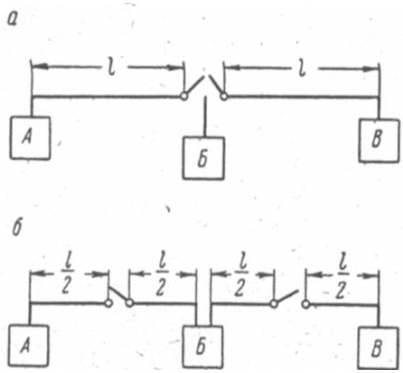


Рис. 19.1. Резервирование питания

Для более ответственных каналов, главным образом связанных с водоснабжением населенных пунктов, и при наличии нескольких источников электроснабжения может быть предусмотрена возможность переключения линии на резервное питание. Для этого линию электропередачи секционируют трехполюсными разъединителями (рис. 19.1). Резервный питающий пункт Б нормально отключен (рис. 19.1, *а*). При необходимости он может питать оба участка – БА и БВ. Более целесообразно использовать питающий пункт Б в качестве постоянно действующего. Если нужно, то пункт Б может временно принять нагрузку всей длины участков БА и БВ (рис. 19.1, *б*).

## 19.5. Трансформаторные подстанции

Для питания электроэнергией приводов управляемых затворов линейного водораспределения и других потребителей оросительной системы устанавливаются трансформаторные подстанции, понижающие напряжение 6000 или 10 000 В до 110 или 220 В.

Мощность таких подстанций невелика; для одиночного затвора она обычно не превышает 1,5–2 кВА. При нескольких потребителях, сосредоточенных в одном месте, нагрузка лежит в пределах 5–10 кВА. Однако в настоящее время наша промышленность не изготовляет трехфазных трансформаторов мощностью менее 20 кВА. Поэтому для питания электроэнергией как однофазных, так и трехфазных потребителей применяются однофазные трансформаторы типа ОМ (однофазный с масляным охлаждением), используемые главным образом для питания цепей железнодорожной автоблокировки.

Эти трансформаторы выпускаются на максимальную мощность 1,2 кВА (рис. 19.2). При больших нагрузках электроснабжение осуществляется однофазными трансформаторами типа ОМСГ мощностью 5–10 кВА, обычно применяющимися в распределительных сетях сельскохозяйственного назначения. Трансформатор типа ОМ и схема включения его обмоток показаны на рис. 19.2.

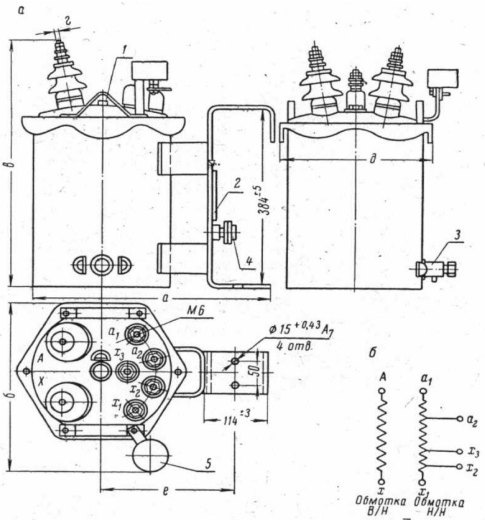



Рис. 19.2. Трансформатор типа ОМ (*а*) и схема включения его обмоток на различные напряжения (*б*): *1* – пробка для заливки масла; *2* – заводской щиток; *3* – пробка для спуска масла; *4* – болт для заземления М10; *5* – пробивной предохранитель

Для электроснабжения трехфазных двигателей однофазные трансформаторы могут объединяться в группы. Число однофазных трансформаторов, питающих трехфазную нагрузку, уменьшается при со-

единении двух трансформаторов в открытый треугольник (рис. 19.3). Известно, что при такой работе отдаваемая трансформаторами мощность на 13,4 % меньше суммарной мощности двух трансформаторов. Например, трансформаторы типа ОМ-1,2/6, включенные в открытый треугольник, при номинальной мощности каждого из них 1–2 кВА отдают мощность $2{,}4 - \frac{2{,}4}{100} 13{,}4 = 2{,}078$ кВА. Эта величина вполне обеспечивает питание электропривода большого числа затворов.

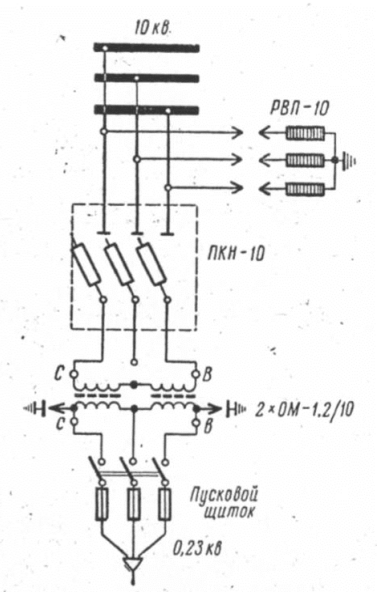



Рис. 19.3. Схема трансформаторной подстанции из двух трансформаторов типа ОМ, соединенных в открытый треугольник

При таком соединении наблюдается некоторая несимметрия в напряжениях вследствие неодинакового падения напряжения в разных фазах. Схема открытого треугольника с трансформатором типа ОМ-1,2/6 проверена в производственных условиях (при автоматизации участка Нижнедонской оросительной системы). Проверка показала, что несимметрия напряжений при нормальной нагрузке не превышает 1–2 %, что не имеет существенного значения для работы асинхронного двигателя.

## 19.6. Расчет линии электропередачи

Особенности электрического расчета линии электропередачи 6–10 кВ оросительных систем сводятся к следующему.

1. Вследствие незначительных электрических нагрузок, лежащих в пределах 1–5 А, провода электропередачи выбираются не по экономической плотности тока, а по механической прочности.

Обычно для линий электропередач, проходящих по ненаселенным местам, применяются стальные однопроволочные провода (за исключением мест пересечения с наземными инженерными сооружениями).

Потери напряжения в трехфазной линии со стальными проводами при сосредоточенной нагрузке определяют по известной формуле:

$$\Delta U = \sqrt{3}\left[r_0 \cos\varphi + \left(x' + x''\right)\sin\varphi\right] I l_i, \qquad (19.1)$$

где $r_0$ – активное сопротивление (Ом/км) стального провода, определяемое в зависимости от тока линии;

$x'$ – внутреннее индуктивное сопротивление стального провода (Ом/км), также определяемое в зависимости от тока линии;

$x''$ – внешнее индуктивное сопротивление (Ом/км), определяемое в зависимости от расстояния между проводами;

cos φ – коэффициент мощности нагрузки линии;

$I$ – нагрузка линии, А;

$l_i$ – длина участка линии до рассматриваемой нагрузки, км.

Часто для вычисления потерь напряжения в линии пользуются формулой, в которой исходной величиной является мощность:

$$\Delta U = \sum \frac{[P r_0 + Q(x' + x'')]}{U_н} \qquad (19.2)$$

где $P$ и $Q$ – соответственно активная и реактивная составляющие мощности.

При увеличении нагрузки потери напряжения растут не только вследствие ее роста, но и вследствие увеличения составляющих удельного сопротивления линии.

2. Допускаемый максимальный процент потерь напряжения в линии не должен превышать 15. Он допускается при условии одностороннего питания линии от единственного источника электроэнергии. В этом случае при выборе соответствующих отпаек трансформатора у потребителя (независимо от места его включения в линию) сохраняется номинальное напряжение.

При наличии резервного источника питания допускаемая величина потери напряжения не должна превышать 7,5 %. Объясняется это тем, что с изменением действующего источника питания потребители, включенные в конце линии, оказываются в ее начале, и соответственно колебания напряжения у потребителей достигают 15 %, что недопустимо.

Кроме того, линию следует проверить на потерю напряжения в пусковом режиме. Здесь, как правило, принимают пуск одного наиболее удаленного двигателя при работе остальных, число которых определяют исходя из коэффициента одновременности.

При трансформаторах типа ОМС потери напряжения в линии с односторонним питанием не должны превышать 5 %.

3. Вследствие сравнительно большой протяженности линий 6–10 кВ следует учитывать их емкостную мощность.

Емкость трехфазной воздушной линии (в ф/км), отнесенная к 1 км длины, для практических расчетов определяется по формуле:

$$C = \frac{0{,}02415}{l\, g^{2} \dfrac{D_{\text{ср}}}{d}} \cdot 10^{-6}, \qquad (19.3)$$

где $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3}}$ – среднее геометрическое расстояние между осями проводов (индексы указывают фазы);

$d$ – внешний диаметр провода (берется по стандарту на провода).

Емкость линии, выполненной проводом ПСО-5, с проводами, расположенными в вершинах равностороннего треугольника со стороной 1 м, равна: $C = 0{,}0092 \cdot 10^{-6}$ф/км.

Емкостная мощность линии (в вольт-ампер реактивный, ВАр) определяется по формуле

$$P_{\text{c}} = U^{2} \omega C l, \qquad (19.4)$$

где $U$ – напряжение линии, В;

ω – угловая частота, равная 314;

$C$ – емкость линии, ф/км;

$l$ – длина линии, км.

Для линии 6 кВ емкостная нагрузка линии на 1 км составит:

$$P_{c} = 6000^{2} \cdot 314 \cdot 0{,}0092 \cdot 10^{-6} = 104 \text{ ВАр/км}.$$

Для линии 10 кВ емкостная нагрузка растет пропорционально квадрату увеличения напряжения и соответственно равна 288 ВАр/км.

В общем в сетях 6 кВ, несмотря на наличие емкостной нагрузки, как правило, преобладает индуктивная нагрузка, и поэтому в отдельных случаях к ней применяют дополнительную емкостную компенсацию: к линии присоединяют статические конденсаторы, улучшающие $\cos\varphi$. Для линии 10 кВ надобность в компенсации индуктивной нагрузки обычно отпадает, так как с увеличением длины линии 10 кВ влияние компенсирующей емкостной мощности быстро возрастает.

4. Во всех случаях, когда представляется выбор между напряжениями 6 или 10 кВ, рекомендуется применять 10 кВ. При этом напряжении (по сравнению с 6 кВ) наибольшая допустимая длина линии увеличивается в 2–2,5 раза. Это объясняется тем, что, кроме уменьшения в 1,73 раза величины тока, сказывается также влияние поверхностного эффекта стальных проводов.

5. Потери напряжения должны определяться с учетом потерь в трансформаторах; при этом следует учитывать не только потери мощности в трансформаторах, нагруженных в данный момент, но и потери холостого хода всех трансформаторов, подключенных к линии (рис. 19.4). При большом количестве подключенных к линии маломощных трансформаторов суммарные потери холостого хода относительно велики и пренебрежение ими может привести к недопустимой погрешности.

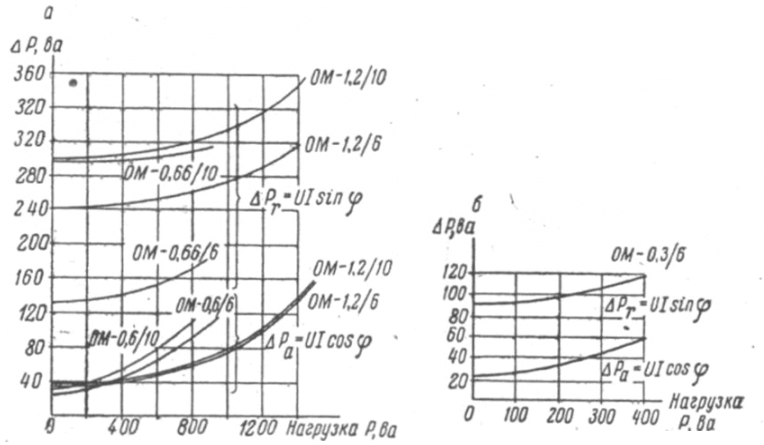



Рис. 19.4. Кривые активных (*а*) и реактивных (*б*) потерь мощности в трансформаторах типа ОМ

Полные активные потери равны:

$$\Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{мн}} \left( \frac{S}{S_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{с}}, \qquad (19.5)$$

где $\Delta P_{\text{т}}$ – полные активные потери мощности в трансформаторе;

$\Delta P_{\text{мн}}$ – активные потери в меди при номинальной нагрузке;

$\Delta P_{\text{м}}$ – активные потери в меди при данной фактической нагрузке;

$\Delta P_{\text{с}}$ – активные потери в стали;

$S$ – фактическая нагрузка трансформатора;

$S_{\text{н}}$ – номинальная мощность трансформатора.

Полные реактивные потери мощности в трансформаторе могут быть определены по формуле:

$$\Delta Q_{\text{т}} = \Delta Q_{\text{мн}} \left( \frac{S}{S_{\text{н}}} \right)^2 + \frac{I_{x.x}^{\%} \cdot S}{100}, \qquad (19.6)$$

где $\Delta Q_{\text{мн}}$ – реактивные потери в меди при номинальной нагрузке;

$$\Delta Q_{\text{мн}} = \sqrt{\left( \frac{U_k^{\%}}{100} S_{\text{н}} \right)^2 - \Delta P_{\text{мн}}^2}, \qquad (19.7)$$

$U_k^{\%}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$I_{x.x}^{\%}$ – ток холостого хода трансформатора, %.

Для определения потерь в трансформаторах типа ОМ показаны кривые, построенные по вышеприведенным формулам.

Для предварительных расчетов допустимую наибольшую длину участков линии можно определить по кривым (рис. 19.5). Предельная длина линии по этим кривым устанавливается в зависимости от удельной нагрузки линии (в кВА/км), которая должна определяться с учетом всех потерь в трансформаторах. При построении кривых (*2* и *3*) учтены емкостная нагрузка линии и зависимость $r_0$ и $x_0$ от нагрузки (в пределах до 65 кВА).

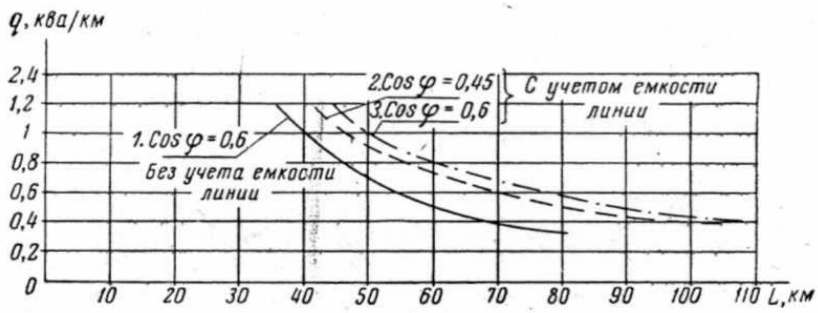



Рис. 19.5. Кривые для определения наибольшей длины участков питания линии напряжением 10 кВ с проводом ПСО-5 в зависимости от плотности нагрузки (кВА/км)

## 19.7. Конструктивные особенности электроснабжения напряжением 6–10 кВ

Целесообразно расположить силовую линию 6–10 кВ как можно ближе к каналу и, следовательно, к автоматизируемым объектам. На рис. 19.6 приведен поперечный профиль канала с размещением вдоль него линии электропередачи и связи, а также других устройств автоматизированной системы. В противном случае удлиняются низковольтные участки сети от линии электропередачи до потребителя, которые обычно выполняются кабелем. Линия связи размещается параллельно линии силового тока на расстоянии, при котором мешающие напряжения и токи в линиях связи находятся в допустимых пределах. Отпайки от линии связи и телемеханики до объектов также выполняются кабелем.

Высоковольтная линия должна на всем протяжении иметь транспозицию (скрещивание) проводов. Протяженность цикла транспозиции принимается равной 9 км, для чего высоковольтные провода *1*, *2* и *3* равномерно меняют свое взаимное расположение через каждые 3 км (рис. 19.7).

Если по длине линии не укладывается целое число циклов и остаток линии составляет длину более 3 км, то на этой длине устраивают самостоятельный полный цикл транспозиции с соответственно укороченным шагом. На участках длиной менее 3 км транспозицию не осуществляют.

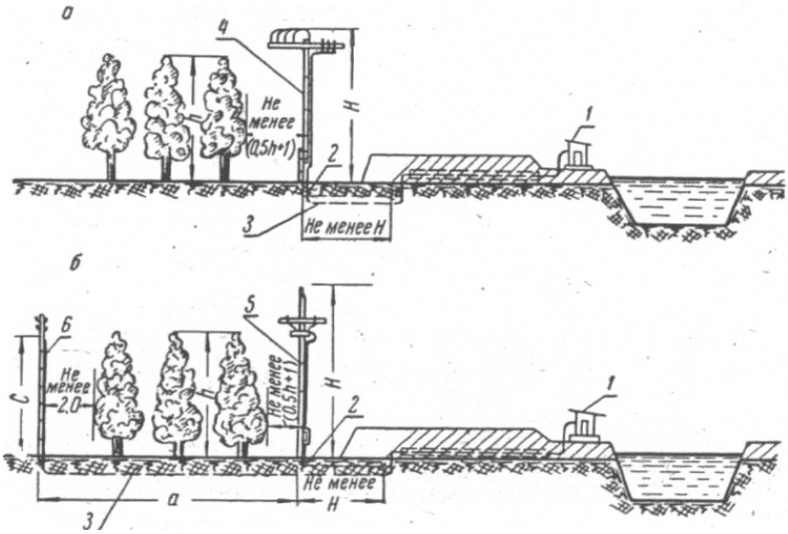



Рис. 19.6. Поперечный профиль канала: *а* – при совмещенной на одних опорах линии связи до 380 В и телемеханики; *б* – при раздельных линиях связи 6–10 кВ и телемеханики; *1* – шкаф управления электроприводом затвора; *2* – кабель напряжением до 1000 В; *3* – кабель связи и телемеханики; *4* – опора совмещенных линий; *5* – опора линии 6–10 кВ; *6* – опора линий связи

Трансформаторные подстанции монтируются на А-образных опорах. На рис. 19.8 показана подстанция из двух трансформаторов ОМС, соединенных в открытый треугольник. Кроме самих трансформаторов, на опоре устанавливаются разрядники, предохранители и разъединители.

Предохранители типов ПКН-6 (предохранитель комбинированный, наружной установки для высоковольтных сетей с номинальным напряжением 6 кВ) и ПКН-10 (соответственно для линии 10 кВ) выполняются однополюсными (рис. 19.9). При необходимости эти разъединители позволяют отключить трансформатор от земли, для чего размыкают врубающий контакт разъединителя, зацепив его скобу шальтштангой.

Применяются также, особенно для трансформаторов ОМС, предохранители и разъединители общепромышленных типов.

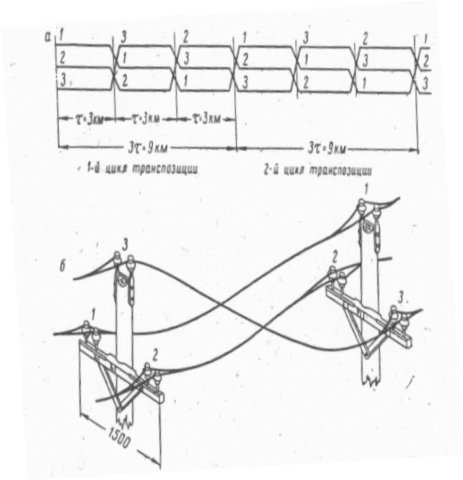



Рис. 19.7. Транспозиция проводов линии напряжением 6–10 кВ: *а* – схема; *б* – устройство транспозиции на промежуточной опоре

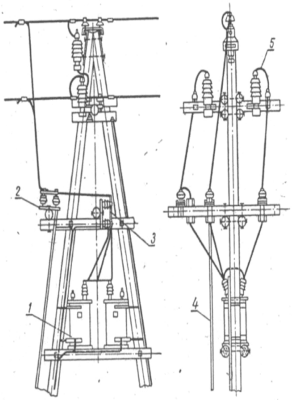


Рис. 19.8. Трансформаторная подстанция из двух трансформаторов ОМС на анкерной опоре: *1* – трансформатор ОМС-5/10(6); *2* – разъединители РЛНД-10; *3* – предохранитель ПК-10(6); *4* – тяга к приводу разъединителя ПРН-10М; *5* – разрядник РВП-10(6)

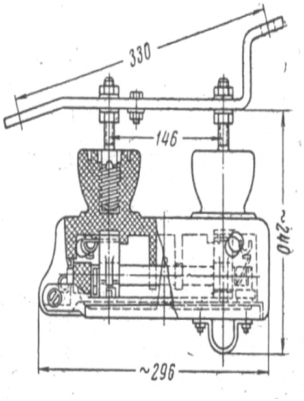



Рис. 19.9. Комбинированные предохранители типов ПКН-6 и ПКН-10

Для защиты трансформаторов от атмосферных перенапряжений к

проводам высоковольтной линии подключают вилитовые разрядники типа РВП-6 или РВП-10, состоящие из вилитовых дисков, соединенных последовательно с искровыми промежутками и собираемых в общем фарфоровом корпусе.

Полный искровой промежуток состоит из ряда отдельных промежутков, каждый из которых образуется из двух латунных дисков, разделенных миканитовой прокладкой.

Деление полного искрового промежутка на ряд отдельных применяется для того, чтобы разбить дугу рабочего напряжения на ряд дуг и тем самым облегчить их гашение.

Трансформаторные подстанции, установленные на опорах, заземляются. К заземлению присоединяются кожухи трансформаторов, цоколи предохранителей, приводы и цоколи разъединителей, разрядники. Сопротивление заземления должно быть не более 10 Ом.

Для аппаратуры низкого напряжения устраивают независимый контур заземления, располагая заземлители обеих систем на расстоянии 5 м один от другого.

# 20. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

## 20.1. Основные источники экономической эффективности автоматизации

В настоящее время существует большое число различных систем автоматической стабилизации технологических параметров инженерных систем. Некоторые системы автоматизации при выборе соответствующих заданий регуляторам способны поддерживать режимы, близкие к оптимальным (квазиоптимальные), заменяя при этом УВМ. Поэтому системы автоматизации нужно сравнивать между собой не только по стоимости и точности, но и по способности поддержания режимов, близких к оптимальным. При этом может оказаться, что системы автоматизации, лучшие для одной функциональной цели, не являются таковыми для другой цели.

Основная цель автоматизации – оптимизация процессов водоподачи, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха и т. д., выбор соответствующих заданий регуляторам, способных поддерживать режимы, близкие к оптимальным (квазиоптимальные), снижение эксплуатационных затрат, уменьшение численности оперативного персонала и на этой основе повышение эффективности функционирования инженерных систем.

Экономическая эффективность автоматизации формируется за счет централизованного контроля и управления технологическими процессами с применением средств микропроцессорной техники, обеспечивающих экономию используемых энергетических и природных ресурсов, повышение урожайности сельскохозяйственных культур, производительности труда эксплуатационного персонала, автоматического регулирования различных технологических параметров.

## 20.2. Оценка экономического эффекта от использования средств автоматизации в сельскохозяйственном производстве

При обосновании экономической целесообразности создания и эксплуатации автоматической или автоматизированной производственной системы необходимо исходить из общепринятых положений теории экономической эффективности капитальных вложений:

1. Экономический эффект от использования средств автоматизации – это экономия общественного труда при производстве каких-либо видов продукции.

2. Целесообразность использования средств автоматизации в конкретной сельскохозяйственной организации обосновывается соотношением экономического эффекта и затрат по каждому варианту.

3. В качестве критерия сравнения вариантов могут приниматься показатели экономической эффективности инвестиций – чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД), индекс доходности (ИД), срок окупаемости с учетом дисконтирования и т. д., отражающие текущие затраты и капитальные вложения (инвестиции).

Формулы чистого дисконтированного дохода позволяют соизмерять разнородные по своему характеру величины – текущие (себестоимость продукции) и единовременные затраты (капитальные вложения в средства автоматизации) – путем отнесения их на весь срок работы средств автоматизации производства при использовании коэффициентов дисконтирования, в течение которого стоимость должна окупиться за счет снижения текущих затрат (себестоимости продукции).

Положительное значение ЧДД говорит об экономической целесообразности внедрения системы автоматизированного производства. Кроме того, определяются вспомогательные показатели с учетом особенностей производства: такт (ритм) потока, часовая производительность, производственная мощность, численность обслуживающего персонала, трудоемкость обработки, выработка на одного работающе-

го, продолжительность производственного цикла, величина незавершенного производства, занимаемая производственная площадь, съем продукции с 1 м$^2$ производственной площади, коэффициент сменности и другие.

Текущие затраты по базовому (существующему) варианту с учетом приведения к тождественному эффекту по объему продукции и качеству $З_1$ определяются по формуле:

$$, З_1 = З'_1(N_{1,}\omega_1) + \Delta З'_1 + \Delta З'_2, \qquad (20.1)$$

где $З'_1(N_{1,}\omega_1)$ – текущие затраты на годовой объем выпуска продукции до внедрения средств автоматизации производства, руб/год;

$\Delta З'_1$ – дополнительные текущие затраты, которые были бы необходимы для выпуска дополнительного объема продукции $\Delta N$, на который увеличится объем выпускаемой продукции в условиях автоматизированного производства, руб/год;

$\Delta З'_2$ – дополнительные текущие затраты, которые были бы необходимы для повышения качества выпускаемой продукции до уровня ($\omega_1$), достигаемого в условиях автоматизированного производства.

Капитальные вложения по базовому (фактическому) варианту с учетом приведения к тождественному эффекту ($К_1$) определяются по формуле:

$$К_1 = К'_1(К_{1,}\omega_1) + \Delta К'_1 + \Delta К'_2, \qquad (20.2)$$

где $К'_1(К_{1,}\omega_1)$ – капиталовложения в производственную систему базового варианта до внедрения средств автоматизации, руб.;

$\Delta К'_1$ – дополнительные капитальные вложения, необходимые для выпуска дополнительного объема продукции, на который увеличится объем продукции в условиях автоматизированного производства, руб.;

$\Delta К'_2$ – дополнительные капиталовложения, необходимые для того, чтобы повысить качество выпускаемой продукции до уровня, достигаемого в условиях автоматизированного производства, руб.

Текущие затраты по проектируемому варианту ($C_2$) рассчитываются по формуле:

$$З_2 = З_2\,(N_2, \omega_2) + З_{экс}, \qquad (20.3)$$

где $З_2\,(N_2, \omega_2)$ – текущие затраты на годовой объем выпуска продукции повышенного качества после внедрения средств автоматизации производства, руб/год;

$З_{экс}$ – текущие затраты на содержание и эксплуатацию средств автоматизации производства, руб/год.

Капитальные вложения по проектируемому варианту *(Кг)* определяются по формуле:

$$К_2 = К_2'(N_2, \omega_2) + К_{авт} - ΔО_{ос}, \qquad (20.4)$$

где $К_2'(N_2, \omega_2)$ – капиталовложения в производственную систему по проектируемому варианту после внедрения средств автоматизации, руб.;

$К_{авт}$ – капитальные затраты, необходимые для реализации мероприятий по внедрению средств автоматизации, руб.;

$ΔО_{ос}$ – оборотные средства, высвобождаемые в результате автоматизации производства.

Размер дополнительных текущих затрат ($ΔЗ_1'$) определяется по формуле:

$$ΔЗ_1' = \sum_{j=1}^{m} S_j\, ΔN_j, \qquad (20.5)$$

где $S_j$ – удельная себестоимость продукции *j*-го наименования, руб.;

$ΔN_j$ – дополнительный объем продукции *j*-го наименования, который может быть выпущен в условиях автоматизации производства, шт/год;

$n$ – число наименований продукции, выпускаемой производственной системой.

Размер дополнительных текущих затрат ($ΔЗ_2'$) рассчитывается по формуле:

$$ΔЗ_2' = \sum_{j=1}^{m} ΔS_j\, Δω_j, \qquad (20.6)$$

где $ΔS_j$ – затраты на повышение качества единицы научно-технического уровня продукции *j*-го наименования, которые были бы необходимы в базовом варианте для доведения уровня качества до его значения в условиях автоматизированного производства;

$\Delta\omega_j$ – приращение научно-технического уровня продукции $j$-го наименования по сравнению с тем, которое будет иметь место в условиях автоматизированного производств.

Текущие затраты на содержание и эксплуатацию средств автоматизации определяются по формуле:

$$З_{экс} = З_{зп} + З_{соц} + З_{ам} + З_{эл} + З_{рем} + З_{вм} + З_{пр}, \qquad (20.7)$$

где $З_{зп} + З_{соц}$ – прямая и дополнительная заработная плата персонала, обслуживающего средства автоматизации и производящего их техническое обслуживание с начислением средств на социальное страхование и налогов, руб/год;

$З_{ам}$ – амортизационные отчисления в зависимости от стоимости средств автоматизации, руб/год;

$З_{эл}$ – затраты на электроэнергию, руб/год;

$З_{рем}$ – затраты на выполнение профилактических и текущих ремонтов, руб/год;

$З_{вм}$– затраты на вспомогательные материалы и другие технические средства, необходимые для нормального функционирования средств автоматизации, руб/год;

$З_{пр}$– прочие затраты на эксплуатацию средств автоматизации (затраты на содержание помещения, освещение, вентиляцию и др.), руб/год.

$$З_{зп} + З_{соц} = \left(\sum_{i=1}^{n} Ч_{1J}\, Ф_{1j} + Ч_{2j} С_{mj} Ф_{эфj} K_{прем}\right)\left(1 + Н_{д.з.н.}\right), \qquad (20.8)$$

где $Ч_{1J}$ – численность инженерно-технических работников (ИТР) $j$-й категории, обслуживающих технические средства автоматизации;

$Ф_{1j}$ – годовой фонд заработной платы ИТР $j$-й категории, руб/чел.-год;

$Ч_{2j}$ – численность рабочих $j$-го разряда, обслуживающих технические средства;

$С_{mj}$ – часовая тарифная ставка рабочего $j$-го разряда, руб/чел.-ч;

$Ф_{эфj}$ – годовой эффективный фонд времени рабочего $j$-го разряда, ч/год;

$K_{прем}$ – коэффициент, учитывающий премии по премиальным системам;

$Н_{д.з.н.}$– коэффициент, учитывающий размер дополнительной заработной платы и отчисления в фонд социальной защиты и другие налоги;

*n* – число категорий инженерно-технических работников и разрядов рабочих.

В качестве критерия экономической эффективности внедрения системы автоматизации будем рассматривать показатель «минимум эксплуатационных затрат в стоимостном выражении за жизненный цикл технической системы». Критерий «минимум затрат за жизненный цикл технической системы» целесообразно применять в качестве критерия экономической эффективности при выборе альтернативных вариантов таких систем, которые в процессе эксплуатации обеспечивают одинаковый экономический результат, а также в тех случаях, когда они расходуют свой ресурс и для проведения экономического сравнения стоимости дорогого изделия с высокой степенью экономичности с более дешевым изделием и низкой экономичностью. Жизненный цикл включает время от начала эксплуатации до утилизации системы. Стоимость жизненного цикла (LCC – Life Cycle Cost) рассчитывается по формуле:

$$С_{жц} = К_н + К_з + З_м + З_{эл} + З_{зп} + З_{соц} + З_а + З_{рто} + З_{ут}, \qquad (20.9)$$

где $К_н + К_з$ – капитальные затраты на покупку нового оборудования (системы автоматизации, строительство здания);

$З_м$ – затраты на монтаж и пусконаладочные работы;

$З_{эл}$ – затраты на электроэнергию;

$З_{зп} + З_{соц}$ – прямая и дополнительная заработная плата персонала, с начислением средств на социальное страхование и налогов, руб/год;

$З_а$ – амортизационные отчисления;

$З_{рто}$ – затраты на ремонт и техническое обслуживание;

$З_{ут}$ – затраты на демонтаж и утилизацию.

Все расходы пересчитываются на год приобретения оборудования с помощью соответствующих дисконтирующих коэффициентов и суммируются за весь период жизни (работоспособности) насосов, срок службы которых обычно составляет от 10 до 20 лет. При суммировании единовременных затрат (в начале периода эксплуатации) и текущих затрат, осуществляемых в разные годы жизненного цикла, необходимо привести их к единому моменту времени путем дисконтирования.

Расчет производится для величин, относящихся к разным срокам службы и на протяжении длительного времени, учитывая инфляцию и эффективность инвестиций, по следующей формуле:

$$C_р = \frac{З_п}{(1+(i-р))^n}, \qquad (20.10)$$

где $C_р$ – расчетная стоимость жизненного цикла, руб.;

$n$ – число лет;

$p$ – средний уровень инфляции, %;

$i$ – банковский процент по депозиту, учитывающий эффективность инвес;

$З_n$ – затраты после $n$ лет эксплуатации, руб.

Обычно учитываются только исходные капиталовложения и эксплуатационные затраты. Применение анализа затрат на протяжении жизненного цикла преследует две цели. Первой и наиболее важной является экономия эксплуатационных расходов, поскольку данный метод позволяет определить, какой из вариантов систем автоматизации обеспечивает оптимальное соотношение цены и качества. Во-вторых, он позволяет минимизировать затраты на оплату труда и потребление электроэнергии.

Основные преимущества критерия интегрального экономического эффекта по сравнению с широко применяемым в настоящее время годовым экономическим эффектом заключаются в следующем.

Интегральный экономический эффект позволяет проводить сравнение проектов, различающихся как затратами, так и результатами. Положительное решение может быть принято по проекту, который характеризуется большими затратами, но и обеспечивает при этом высокий результат за рассматриваемый период.

Он позволяет учитывать в расчетах экономическую динамику, обусловленную движением ставок, цен на ресурсы и продукцию, изменения во времени объемов производства в натуральном и в стоимостном выражении.

## 20.3. Определение ожидаемой годовой экономии при автоматизации технологических процессов в мелиорации земель

Факторами годовой экономической эффективности АСУ ТП оросительной системы в области производственной деятельности являются:

– прибыль от реализации дополнительно полученной сельскохозяйственной продукции в результате увеличения урожайности культур на орошаемых площадях за счет оптимизации сроков и норм водополива и улучшения работы насосных станций;

– дополнительная прибыль от сдачи государству сельскохозяйственной продукции, полученной на землях, орошаемых сэкономленной водой;

– сокращение численности обслуживающего персонала насосных станций;

– сокращение затрат по расходу, электроэнергии, потребляемой насосными станциями и другими потребителями.

В области управления улучшаются условия труда и повышается производительность труда работников управления.

Годовая экономия определяется по формуле:

$$Э_{год} = (Э_1 + Э_2 + Э_3 + Э_4) - Р_{экс}, \qquad (20.11)$$

где $Э_1$ – дополнительная прибыль от реализации сельскохозяйственной продукции, полученной за счет повышения урожайности сельскохозяйственных культур, тыс. руб.;

$Э_2$ – дополнительная прибыль от реализации сельскохозяйственной продукции, полученная на землях, орошаемых сэкономленной водой, тыс. руб.;

$Э_3$ – экономия фонда заработной платы от сокращения численности обслуживающего персонала, тыс. руб.;

$Э_4$ – экономия средств по расходу электроэнергии, тыс. руб.

Повышение урожайности сельскохозяйственных культур на орошаемых землях достигается за счет совершенствования процесса полива, регулирования и контроля водоподачи и водораспределения, улучшения организации обслуживания гидросооружений.

Опыт внедрения автоматизированных систем в нашей стране и за рубежом показывает, что в результате обеспечения оптимальных режимов орошения, водораспределения и качественно нового уровня в управлении водным балансом оросительных систем урожайность сельскохозяйственных культур повышается на 10 - 15%.

Экономия за счет повышения урожайности основных сельскохозяйственных культур определяется по формуле:

$$Э_1 = \left(S_i У_р К_у\right)(Ц - С), \qquad (20.12)$$

где $S_j$ – площадь, занятая под посевами соответствующих культур, га;

$У_р$ – урожайность с 1 га, ц;

Ц – закупочная цена 1 ц, руб.;

С – себестоимость 1 ц, руб.;

$К_у$ – коэффициент, учитывающий повышение урожайности.

В связи с тем, что за воду, подаваемую на орошение, в большинстве случаев не берется плата, возможную экономию от снижения ее расхода определяют за счет получения дополнительной прибыли от реализации сельскохозяйственной продукции, собранной на землях, орошаемых сэкономленной водой.

Возможный объем сэкономленной воды определяется по формуле:

$$Э_{в=}(V_1 К_в) + (V_ч К_н), \qquad (20.13)$$

где $V_1$ – годовой расход воды на орошаемую площадь, тыс. м$^3$;

$V_н$ – непроизводительные потерн воды, тыс. м$^3$;

$К_в$ – коэффициент, учитывающий снижение расхода воды;

$К_п$ – коэффициент, учитывающий снижение непроизводительных потерь воды.

$$S_i = \frac{Э_в}{Н_п} \qquad (20.14)$$

где $S_i$ – дополнительная площадь, которую можно оросить сэкономленной водой;

$Н_п$ – сезонная норма-полива озимой пшеницы, м$^3$/га.

Валовой сбор культур с дополнительно орошаемой площади ($ω_о$) определяется как разница урожайности на поливных и неполивных участках:

$$ω_0 = S_i(У_1 - У_2)К_{у1,} \qquad (20.15)$$

где $У_1$, $У_2$ – урожайность соответственно на поливных и неполивных землях, ц;

$К_{у1}$ – коэффициент, учитывающий повышение урожайности после внедрения АСУ ТП.

Экономия определяется по формуле:

$$Э_2 = (Ц - С)ω_0 - (С_2 S_i), \qquad (20.16)$$

где $С_2$ – затраты на эксплуатацию 1 га орошаемой площади, руб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов: учебник / И. Ф. Бородин, Ю. А. Студник. – М.: Колос С, 2007. – 344 с.

2. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин. – М.: Агропромиздат, 2005. – 270 с.

3. Об утверждении Программы развития промышленного комплекса Республики Беларусь на период до 2020 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь, 05.07.2012 г., № 622 // Законодательство Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – URL: http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm1/sovm263/index.htm. – Дата обращения: 20.10.2019.

4. Фурсенко, С. Н. Автоматизация технологических процессов : учеб. пособие / С. Н. Фурсенко, Е. С. Якубовская, Е. С. Волкова. – Минск : БГАТУ, 2007. – 592 с.

5. Фурсенко, С. Н. Автоматизация технологических процессов : учеб. пособие / С. Н. Фурсенко, Е. С. Якубовская, Е. С. Волкова. – Минск : Новое знание ; М.: ИНФРА-М, 2015. – 376 с.

6. Нестеров, А. Л. Проектирование АСУТП : метод. пособие. В 2 кн. / А. Л. Нестеров. – СПб. : Изд-во ДЕАН, 2009. – Кн. 2. – 944 с.

7. ТКП 45-4.04-149–2009. Системы электрооборудования жилых и общественных зданий. Правила проектирования. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 74 с.

8. ТКП 385–2012 (02230). Нормы проектирования электрических сетей внешнего электроснабжения напряжением 0,4–10 кВ сельскохозяйственного назначения. – Введ. 19.04.2012. – Минск : Минскэнерго, 2009. – 102 с.

9. ГОСТ 21.613–2014. СПДС. Правила выполнения рабочей документации силового электрооборудования. – Взамен ГОСТ 21.613–88 ; введ. 20.10.2014. – М. : Стандартинформ, 2015. – 25 с.

10. ГОСТ 21.408–2013. СПДС. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. – Взамен ГОСТ 21.408–93 ; введ. 2016-03-01. – Минск : Госстандарт, 2013. – 37 с.

11. ГОСТ 21.208–2013. СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – Взамен ГОСТ 21.404–85 ; введ. 2016-03-01. – Минск : Госстандарт, 2013. – 27 с.

12. ГОСТ 2.780–96. ЕСКД. Обозначения условные графические. Кондиционеры рабочей среды, емкости гидравлические и пневматические. – Введ. 01.01.1998. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 7 с.

13. ГОСТ 2.782–96. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Машины гидравлические и пневматические. – Введ. 01.01.1998. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 12 с.

14. ТР 2007/003/BY. Технический регламент Республики Беларусь. Единицы измерений, допущенных к применению на территории Республики Беларусь. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Госстандарт, 2007. – 31 с.

15. ГОСТ 24.701–86. ЕСКД. Надежность автоматизированных систем управления. – Введ. 01.07.1987. – М. : Стандартинформ, 2009. – 11 с.

16. Воробьев, В. А. Электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства: учебник / В. А. Воробьев. – М.: Колос С, 2007. – 279 с.

17. Рульнов, А. А. Автоматическое регулирование: учебник / А. А. Рульнов, И. И. Горюнов, К. Ю. Евстафьев. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 340 с.

18. Электротехника и электроника: учеб. пособие / В. В. Кононенко [и др.]. – 4-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 778 с.

19. SIEMENS. SIMATIC. S7. Программируемый контроллер. S7-1200. Системное руководство. – SIEMENS, 2009. – 398 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ..... 3
ВВЕДЕНИЕ ..... 9
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ И ПРИБОРАХ ..... 12
1.1. Основные понятия и определения техники измерений ..... 12
1.2. Измерительные преобразователи и приборы ..... 14
1.2.1. Первичный преобразователь. Основные характеристики ..... 17
1.2.2. Вторичные приборы систем автоматического контроля ..... 19
1.3. Погрешности измерений ..... 21
1.4. Класс точности средств измерений ..... 24
2. ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ ..... 25
2.1. Общие сведения о датчиках ..... 25
2.2. Реостатные датчики ..... 26
2.3. Индуктивные и трансформаторные датчики ..... 29
2.4. Емкостные и пьезоэлектрические датчики ..... 32
2.5. Датчики температуры ..... 39
2.6. Электромеханические датчики уровня, давления, расхода и скорости потока ..... 46
2.6.1. Методы измерения расхода воды ..... 51
2.6.2. Вихревые расходомеры ..... 54
2.6.3. Вихревые расходомеры с процессией воронкообразного вихря ..... 57
2.6.4. Вихревые расходомеры с осциллирующей струей ..... 58
2.6.5. Электромагнитный расходомер ..... 61
2.6.6. Расходомер – счетчик электромагнитный РСМ–05–03 ..... 70
2.7. Датчики влажности ..... 73
3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ..... 75
3.1. Измерение давления и разности давления ..... 75
3.2. Измерение расхода и количества вещества ..... 84
3.3. Измерение температуры ..... 97
3.4. Измерение и визуализация уровня жидкостей в закрытых емкостях и открытых каналах ..... 105
3.5. Измерение влажности ..... 115
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ..... 120
4.1. Электрическая цепь и ее элементы ..... 120
4.2. Классификация электрических токов и напряжений ..... 121
4.3. Классификация электрических цепей и их элементов ..... 123
4.4. Параметры элементов электрической цепи ..... 124
4.5. Изображение электрических цепей ..... 127
4.6. Положительные направления токов и напряжений ..... 129
5. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ..... 132
5.1. Общие сведения о системах автоматизации ..... 132
5.2. Классификация автоматических систем ..... 135
5.3. Типы систем автоматического регулирования ..... 138
5.4. Три основных класса систем автоматического регулирования ..... 140
5.5. Принципы автоматизации инженерных систем ..... 141
5.6. Основные сведения по составлению схем автоматики ..... 143
5.7. Функциональные и структурные схемы автоматики ..... 146
6. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ..... 148
6.1. Разработка конструкторской документации ..... 148

6.2. Графическое оформление схем автоматизации ..... 150
6.3. Сигнализация, защита и блокировка..... 153
7. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ..... 158
7.1. Основные понятия и определения..... 158
7.2. Автоматическое регулирование температуры..... 165
7.3. Автоматическое регулирование давления..... 172
7.4. Автоматическое регулирование расхода воды..... 178
7.5. Автоматическое регулирование уровня воды ..... 181
7.6. Автоматическое регулирование с помощью микропроцессоров..... 187
7.7. Регулирующие органы и механизмы ..... 189
8. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ ..... 192
8.1. Функции элементов автоматики..... 192
8.2. Основные параметры элементов автоматики..... 195
8.3. Элементы автоматики ..... 200
8.4. Характеристики элементов автоматики..... 203
8.5. Контактные и бесконтактные элементы ..... 207
9. УСИЛИТЕЛИ, БЛОКИ СРАВНЕНИЯ, ЗАДАТЧИКИ, КОМАНДНЫЕ УСТРОЙСТВА..... 208
9.1. Полупроводниковые усилители ..... 208
9.2. Гидравлические и пневматические усилители..... 210
9.3. Электромагнитные командные устройства автоматики ..... 214
9.3.1. Электромагнитные реле и электромагниты..... 214
9.3.2. Электромагнитное реле герконового типа..... 220
9.3.3. Программируемые логические контроллеры ..... 222
10. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ..... 225
10.1. Классификация исполнительных механизмов ..... 225
10.2. Электрические исполнительные механизмы (сервомоторы) ..... 226
10.3. Гидравлические и пневматические исполнительные механизмы..... 232
11. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ..... 234
11.1. Назначение и принципы автоматизации..... 234
11.2. Автоматизация тепловых вводов ..... 236
11.3. Автоматизация теплового режима помещения ..... 238
11.4. Автоматизация водяных систем отопления..... 243
11.5. Автоматизация систем воздушного отопления и воздушных тепловых завес ... 245
11.6. Автоматизация теплоснабжения коттеджей..... 247
12. АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ... 249
12.1. Автоматизация систем горячего водоснабжения..... 249
12.2. Автоматическое управление насосами ..... 252
12.3. Автоматизация хозяйственно-питьевого и противопожарного водоснабжения. 256
12.4. Автоматизация узлов водоотведения зданий ..... 262
12.5. Автоматизация водооборотного водоснабжения ..... 263
13. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА..... 265
13.1. Автоматизация приточной системы вентиляции ..... 265
13.2. Автоматизация работы группы приточных систем..... 267
13.3. Автоматизация вытяжных систем вентиляции ..... 270
14. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ..... 271
14.1. Схемы управления насосными агрегатами..... 271
14.2. Заливка насосов водой ..... 274
14.3. Автоматический пуск и остановка центробежных насосов ..... 278

14.4. Управление насосным агрегатом с электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе ..... 282
14.5. Управление насосным агрегатом с вакуум-насосом и электрифицированной задвижкой на напорном трубопроводе ..... 283
14.6. Автоматическое, полуавтоматическое и программное управление насосными станциями ..... 285
14.7. Регулирование подачи центробежных насосов ..... 287
14.8. Гидропневматические напорно-регулирующие установки ..... 297
14.9. Источники питания повышенной частоты ..... 303
15. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК АРТЕЗИАНСКИХ СКВАЖИН ..... 304
15.1. Особенности автоматизации артезианских насосных установок ..... 304
15.2. Схемы автоматического управления артезианскими насосными агрегатами ..... 308
15.3. Схемы самозапуска артезианских автоматических насосных установок ..... 309
15.4. Электродные датчики и их установка в водопонижающих скважинах ..... 310
16. АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ ..... 312
16.1. Степень автоматизации мелиоративных систем ..... 312
16.2. Выбор затворов автоматизированных сооружений на мелиоративных системах ..... 315
16.3. Минимальная необходимая мощность электропривода ..... 319
16.4. Выбор электропривода ..... 324
16.5. Скорость маневрирования затворами ..... 326
16.6. Автоматизация капельного орошения ..... 326
17. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ..... 335
17.1. Устройство трехфазных асинхронных машин ..... 335
17.2. Вращающееся двухполюсное поле ..... 339
17.3. Вращающееся многополюсное поле ..... 342
17.4. Режимы работы трехфазной асинхронной машины ..... 346
17.5. Заземления и зануления в трехфазных сетях ..... 349
17.6. Расчет мощности и выбор электродвигателя ..... 354
17.7. Классификация режимов работы электропривода ..... 358
17.8. Релейно-контакторное управление ..... 365
18. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ..... 370
18.1. Классификация и назначение систем телемеханики ..... 370
18.2. Системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации ..... 372
18.2.1. Системы телеизмерения ближнего и дальнего действия ..... 372
18.2.2. Системы телеуправления и телесигнализации ..... 374
18.2.3. Принципы построения управляющих вычислительных комплексов ..... 376
18.3. Требования мелиоративных систем к устройствам телемеханики ..... 380
18.4. Объемы телемеханизации ..... 384
19. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ..... 387
19.1. Особенности электроснабжения ..... 387
19.2. Централизованное электроснабжение ..... 388
19.3. Система электроснабжения напряжением 6–10 кВ ..... 389
19.4. Резервирование электроснабжения ..... 391
19.5. Трансформаторные подстанции ..... 391
19.6. Расчет линии электропередачи ..... 394
19.7. Конструктивные особенности электроснабжения напряжением 6–10 кВ ..... 398

20. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ..... 401
20.1. Основные источники экономической эффективности автоматизации ..... 401
20.2. Оценка экономического эффекта от использования средств автоматизации в сельскохозяйственном производстве ..... 402
20.3. Определение ожидаемой годовой экономии при автоматизации технологических процессов в мелиорации земель ..... 407
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ..... 410

У ч е б н о е  и з д а н и е

**Дуброва** Юрий Николаевич
**Кумачёв** Леонид Иванович
**Другомилов** Роман Александрович и др.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е. П. Савчиц*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 29.07.2020. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 24,18. Уч.-изд. л. 21,19.
Тираж 60 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.