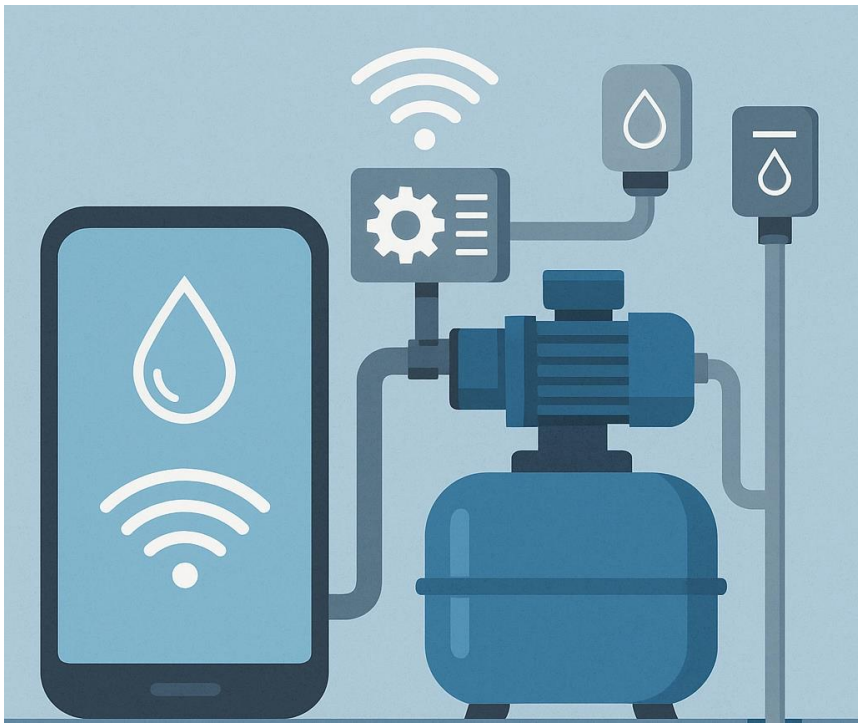
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева»

Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова

Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Журавлева Л.А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Учебное пособие



Москва 2026

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова

Бенин Дмитрий Михайлович
Гавриловская Надежда Владимировна
Журавлева Лариса Анатольевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Учебное пособие

Москва 2026

УДК 628.1+681.5
ББК 38.761:32.973.26
А22

Бенин Д.М., Гавриловская Н.В., Журавлева Л.А. Автоматизация систем
А22 водоснабжения и водоотведения : учебное пособие для студентов по направлению подготовки: 08.03.01 Строительство, 20.03.02 Природообустройство и водопользование, 35.03.11 Гидромелиорация / Д.М. Бенин, Н.В. Гавриловская, Л.А. Журавлева // ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. – Москва; Саратов : Амирит, 2026. – 123 с.

ISBN 978-5-00279-231-3

В учебном пособии рассмотрены основы автоматизации и управления технологическими процессами, а также основы метрологии и техники измерений, раскрываются принципы автоматического регулирования технологических процессов. В учебном пособии приводятся схемы автоматического регулирования типовых технологических параметров, освещается вопрос дистанционного управления и основ телемеханики. Отдельное внимание в пособии уделяется вопросам автоматизации систем водоснабжения, водоотведения, а также автоматизированным системам управления технологическими процессами. Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 08.03.01 «Строительство», 20.03.02 Природообустройство и водопользование, 35.03.11 Гидромелиорация.

УДК 628.1+681.5
ББК 38.761:32.973.26

ISBN 978-5-00279-231-3

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 5
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. ПОНЯТИЕ МЕТРОЛОГИИ И ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЙ 7
1.1. Основные понятия управления 7
1.2. Иерархия управления системами водообработки 9
1.3. Основные понятия регулирования 11
1.4. Виды автоматических систем регулирования 13
1.5. Основные понятия и определения техники измерений 16
1.6. Измерительные преобразователи и приборы 17
1.7. Погрешности измерений 18
1.8. Класс точности средств измерений 21
РАЗДЕЛ 2. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 23
2.1. Измерение давления и разности давлений 23
2.2. Измерение расходов газов и жидкостей 27
2.3. Измерение уровней жидкостей 34
2.4. Измерение температуры 35
2.5. Измерение качественных параметров питьевых и сточных вод 39
РАЗДЕЛ 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ. ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОСНОВЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ 46
3.1. Основные свойства объектов регулирования 46
3.2. Оценки качества автоматического регулирования 52
3.3. Основные законы автоматического регулирования и типы регуляторов 54
3.4. Настройка автоматических регуляторов 57
3.5. Классификация систем автоматического регулирования 59
3.6. Микропроцессорные регуляторы 60
3.7. Регулирующие органы и исполнительные механизмы 63
3.8. Схемы автоматического регулирования типовых технологических параметров 67
3.8.1. Графическое оформление схем автоматизации 67
3.8.2. Автоматическое регулирование расхода 71
3.8.3. Автоматическое регулирование уровня 73
3.8.4. Автоматическое регулирование давления 75
3.8.5. Автоматическое регулирование температуры 76
3.8.6. Автоматическое регулирование pH 79
3.8.7. Автоматическое регулирование параметров состава и качества 80
3.8.8 Сигнализация, защита и блокировка 81
РАЗДЕЛ 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ 85
4.1. Методы и средства телеизмерения 85

4.2. Методы и схемы телеуправления и телесигнализации 86
4.3. Промышленные схемы телемеханики....87
4.4. Основные схемы автоматизации насосных станций 88
4.5. Автоматическое управление насосами в системах водоснабжения....89
4.6. Автоматическое управление насосами в системах водоотведения....91
4.7. Автоматизация технологических процессов в системах водоснабжения 95
4.7.1. Автоматизация водоприемников....95
4.7.2. Автоматизация процесса коагуляции природных вод 97
4.7.3. Автоматизация процессов отстаивания и фильтрации воды....99
4.7.4. Автоматизация процессов обеззараживания....101
4.7.5. Автоматизация процессов фторирования воды 103
4.7.6 Автоматизация процессов реагентного умягчения воды....104
4.7.7 Автоматизация стабилизационной обработки воды....105
РАЗДЕЛ 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ 106
5.1. Автоматизация процессов механической очистки сточных вод 106
5.2. Автоматизация процессов физико-химической очистки сточных вод....108
5.3. Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод 109
5.4. Автоматизация процесса сбраживания осадков сточных вод 110
5.5. Автоматизация процесса механического обезвоживания осадков 111
РАЗДЕЛ 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУТП) 115
6.1. Назначение и общая характеристика АСУТП....115
6.2. Техническое обеспечение АСУ ТП....117
6.3. Программное и математическое обеспечение АСУ ТП....118
6.4. Организационное обеспечение и оперативный персонал АСУ ТП 119
6.5. Основные этапы создания АСУ ТП 120
6.6. Оценка технико-экономической эффективности систем автоматизации....120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 122

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие градостроительства характеризуется наличием определившихся основных элементов планировочной структуры городов: микрорайонов, жилых районов, жилых массивов, планировочных зон, а также города в целом.

В настоящее время основными объектами строительства в городах являются многоэтажные жилые дома, оснащенные всеми видами инженерного оборудования и благоустройства. Инженерное оборудование, представляющее собой комплекс технических устройств, предназначено для обеспечения комфортных условий быта и трудовой деятельности населения, коммунальных и промышленных предприятий. Инженерное оборудование включает в себя системы водоснабжения, канализации, теплоснабжения, газоснабжения, электроснабжения, связи, освещения, санитарной очистки и других видов благоустройства.

Благоустройство города есть совокупность мероприятий, обеспечивающих наилучшее сочетание производственных, культурно-бытовых и гигиенических условий для жизни и производственной деятельности населения. Поэтому при соответствующем технико-экономическом обосновании могут проектироваться региональные системы водоснабжения, канализации, теплоснабжения, газоснабжения и так далее с целью обеспечения инженерным оборудованием расположенных рядом городов и других населенных пунктов. Основная задача при проектировании — выбор источников водоснабжения, электроснабжения, теплоснабжения с учетом технологических, экологических, экономических и других требований и предпосылок для размещения строек в тех или иных районах с точки зрения проведения необходимых работ по развитию всех видов инженерных коммуникаций. Определить в связи с этим целесообразные размеры жилых массивов, районов и микрорайонов.

Повышение качества строительства в современных социально-экономических условиях связано с поиском принципиально новых подходов при осуществлении проектно-строительной деятельности, внедрением новых экономических и ресурсосберегающих инженерных систем, новых технологий производства строительных материалов.

Структурная перестройка производственной базы жилищного строительства ориентирована на внедрение новых эффективных технологий по выпуску конструкций, материалов и изделий, обеспечивающих энерго-, материало- и трудозатраты как в процессе производства, так и в период эксплуатации. Совершенно ясно и понятно, что повысить привлекательность территорий для реализации инвестиционных проектов жилищно--гражданского строительства поможет заблаговременно опережающая инженерная подготовка сетей водоснабжения, канализации, теплоснабжения, газоснабжения, электроснабжения, связи, освещения, санитарной очистки.

Приступая к проектированию инженерных сетей, студент должен изучить принципиальные направления в развитии инженерных коммуникаций, их взаимосвязи, а также связь с жилищным и культурно-бытовым строительством в общем комплексе градостроительства. Инженерные сети определяют эффективность капитальных вложений, поскольку на их строительство выделяется около одной трети всех средств, вкладываемых в застройку и реконструкцию городов.

Цель данного учебного пособия — ознакомить будущих специалистов с комплексом вопросов, связанных с устройством и проектированием систем водоснабжения и канализации населенных мест и промышленных предприятий, а также систем теплоснабжения, газоснабжения и электроснабжения.

Основная задача изучения дисциплины – получение общетеоретических сведений и навыков по основным инженерным сетям и коммуникациям, расположенным в населенном пункте или городе.

Специалист по строительству должен обладать *общими компетенциями*, включающими в себя способность (по базовой подготовке). Посмотрим, как они связаны с обучением такому предмету, как «Инженерные сети городов и населенных пунктов».

По результатам изучения дисциплины студент должен *иметь практический опыт:*

- по использованию необходимых нормативных документов по тематике проектирования инженерных сетей;
- навыки по самостоятельному выполнению расчетов основных технических и гидравлических параметров таких систем, как водоснабжение, водоотведение, тепловые сети, газоснабжение, сети электроснабжения, слаботочные сети;
- должен уметь выполнять классификацию систем водоснабжения, водоотведения, тепловых сетей, газоснабжения, сетей электроснабжения, слаботочных сетей;
- самостоятельно выполнять технологические схемы по устройству инженерных сетей;
- владеть современными методами проектирования инженерных сетей;
- самостоятельно выполнять расчеты трубопроводов инженерных сетей.

Студент, изучивший дисциплину должен знать:

- что такое система водоснабжение;
- какие существуют схемы системы водоснабжения;
- что такое свободный напор и каким образом он рассчитывается;
- классификацию, назначение и роль водопроводных линий;
- основные правила трассировки системы водоснабжения;
- этапы проектирования водопроводных линий;
- основные формулы гидравлического расчета водопроводной системы;
- определение сточных вод и их классификацию;
- систему и схему канализации;
- основные правила трассировки канализационной сети;
- основные методы проектирования канализационных сетей;
- определение системы теплоснабжения;
- элементов системы теплоснабжения;
- основные правила трассировки сетей теплоснабжения;
- классификацию систем центрального теплоснабжения;
- основное устройство тепловых пунктов;
- методы проектирования систем теплоснабжения и тепловых сетей;
- определение автономного теплоэнергоснабжения;
- понятие поливалентной системы теплоснабжения;
- основные нормы и режимы газоснабжения;
- расчетные схемы сетей и системы газоснабжения;
- определение основных нагрузок на сеть газоснабжения;
- понятие системы электроснабжения;
- схема и устройство городских электрических сетей;
- основные понятия слаботочных систем;
- основные принципы размещения подземных сетей в плане;
- основные принципы размещения инженерных сетей в вертикальной плоскости.

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. ПОНЯТИЕ МЕТРОЛОГИИ И ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Главной целью при изучении данного раздела является получение общетеоретических сведений о системах водоснабжения городов и населенных пунктов, их классификации, определения расчетных расходов.

Целью изучения раздела является изучение элементов комплекса системы водоснабжения, обретения навыков по определению суточных и часовых расходов воды, определению свободных напоров, проведению гидравлических расчетов.

Темы раздела:

Основные понятия управления
Иерархия управления системами водообработки
Основные понятия регулирования
Виды автоматических систем регулирования
Основные понятия и определения техники измерений
Измерительные преобразователи и приборы
Погрешности измерений
Класс точности средств измерений

1.1. Основные понятия управления

В общем случае под автоматизацией понимают применение технических средств и систем управления, частично или полностью освобождающих человека от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи или использования энергии, материалов или информации. **Цель автоматизации** — повышение производительности и эффективности труда, улучшение качества продукции, устранение человека от работы в условиях, опасных для здоровья.

Под управлением в технических системах понимают совокупность действий (работа, исполнение командных сигналов), выбранных на основе определенной информации и направленных на поддержание заданных параметров производственного процесса и заданных режимов эксплуатации технологического оборудования или направленных на улучшение функционирования технологического объекта в соответствии с имеющейся программой или целью функционирования.

В приведенных определениях содержатся два дополнительных понятия — система и процесс.

Система — это целенаправленная совокупность элементов, взаимосодействующих достижению заданного полезного результата. Существует много определений этого термина ввиду огромного многообразия существующих систем (система уравнений, солнечная система, системы питания, транспорта, образования, вычисления и др.). Рекомендуется каждый раз использовать то определение, которое наиболее близко к изучаемым объектам.

Например, Система водоснабжения — комплекс взаимосвязанных сооружений, обеспечивающий подачу воды потребителям, включающий водозаборные сооружения, насосные станции, сооружения по улучшению качества воды, регулирующие и запасные емкости, водоводы, водопроводящую сеть труб и охладители воды. Система канализации (водоотведения) населенных пунктов и промышленных предприятий — комплекс взаимосвязанных сооружений, обеспечивающий отведение и очистку сточных вод от потребителей воды, включающий канализационную сеть труб, насосные станции по перекачке, сооружения по очистке сточных вод и выпуски очищенных стоков в реки и

водоемы.

Из приведенных определений отчетливо видно, что любая СВВ может быть расчленена на ряд производственных и технологических процессов, под которыми понимают такую транспортировку и обработку исходных потоков воды, которые приводят к изменению их физических и химических свойств, а также к превращению в очищенную воду и побочные продукты очистки.

Под **производственным процессом** понимают временною последовательность в СВВ, при которой происходят перемещение и преобразование вещества (воды, реагентов, энергии) и (или) информации. Практически все современные производственные процессы в СВВ должны выполняться в соответствии с определенными инструкциями, строительными нормами и правилами (СНиП).

Под **технологическим процессом** понимают такую обработку воды и полуфабрикатов (промежуточных потоков, осадков), которая приводит к изменению их физических и химических свойств и превращению в конечную продукцию. Иными словами, технологический процесс в СВВ — это совокупность механических, физико-химических, биологических и других процессов целенаправленной обработки воды и ее побочных продуктов.

Любой технологический процесс характеризуется определенными технологическими параметрами, которые могут изменяться во времени. В СВВ такими параметрами являются расходы материальных и энергетических потоков, химический состав, температура, давление, уровень в емкостях и др. Совокупность технологических параметров, полностью характеризующих конкретный технологический процесс, называется технологическим режимом.

Каждый технологический процесс в СВВ имеет свое целевое назначение, в соответствии с которым к нему предъявляют определенные требования: обеспечение заданной или максимальной производительности, заданного или наилучшего качества обработки воды, заданных или минимальных затрат реагентов и энергии на единицу обработанного потока воды, биогаза или осадков. Так, например, целью процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод является увеличение концентрации метана в образующемся биогазе. Поэтому к процессу сбраживания можно предъявить требование обеспечения заданного количества и концентрации биогаза (производительность и качество побочного продукта) при минимальном расходе греющего пара (энергии) или заданного количества и максимальной концентрации метана при заданном расходе греющего пара.

Обобщенная схема технологического процесса показана на рис. 1.1. Функция управления представлена как соотношение между входами и теми преобразованиями, которые необходимы для получения целевой продукции. Выполнение требований, предъявляемых к технологическому процессу, возможно лишь при целенаправленном воздействии на его технологический режим.



Рис. 1.1. Обобщенная схема технологического процесса

Любой технологический процесс в СВВ подвержен действию различных факторов, которые нельзя предусмотреть заранее. Такие факторы называются **возмущениями.** К ним относятся, например, случайные изменения состава обрабатываемой воды, температуры,

характеристик оборудования и др.

Возмущающие воздействия на технологический процесс вызывают изменения технологического режима, что, в свою очередь, приводит к изменению таких ТЭП процесса, как производительность, качество обработки, расход реагентов и энергии и т. п. Поэтому для обеспечения требуемых (заданных) ТЭП необходимо компенсировать колебания технологического режима, вызванные действием возмущений. Такое целенаправленное воздействие на технологический процесс представляет собой **процесс управления.** Совокупность требований, осуществляемых в процессе управления, называется **целью управления.** Наконец, сам управляемый технологический процесс вместе с оборудованием, в котором он реализуется, является **объектом управления.** Объект управления и устройства, необходимые для осуществления процесса управления, называются **системой управления.** Таким образом, система управления — это совокупность технологического процесса, оборудования, средств контроля и управления.

В качестве примера рассмотрим управление температурой сбраживания осадков в метантенке, которая поддерживается с помощью «острого» пара (рис. 1.2). При случайных (заранее неизвестных) колебаниях теплового режима сбраживания, например за счет изменения температуры осадков, пара или окружающей среды, для управления температурой в метантенке *1* она контролируется измерителем *2*, выходной сигнал которого поступает в усилитель *3,* затем в преобразователь *4* и далее в управляющее устройство *5.* В этом устройстве сигнал о текущем значении температуры $t_З$ сравнивается с требуемым $t_т$, поступающим от датчика 6.

В зависимости от величины и знака разности сравниваемых сигналов $\Delta t = t_T - t_З$ исполнительный механизм 7, управляя регулирующим органом *8,* увеличивает или уменьшает подачу пара в метантенк.

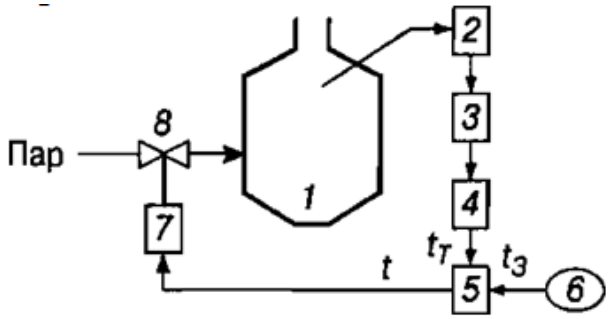


Рис. 1.2. Регулируемый тепловой режим сбраживания осадков сточных вод как система управления

1.2. Иерархия управления системами водообработки

Современные СВВ весьма сложны и характеризуются большим числом технологических параметров, прямо или косвенно влияющих на их технико-экономические показатели. Поэтому управление транспортом и обработкой как природных, так и сточных вод организуют по так называемому иерархическому принципу.

Иерархический принцип управления заключается в многоступенчатой организации процесса управления, где каждая ступень имеет свои объекты и цели управления. Рассмотрим сущность этого принципа управления технологическим процессом. Чаще всего целью управления является достижение заданных ТЭП процесса, которые зависят от технологического режима. Режим, при котором достигаются заданные показатели, называется **оптимальным.** Но, как уже указывалось, технологический режим изменяется под действием случайных возмущений 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 технологическим процессом можно организовать в виде двух ступеней.

На верхней ступени цель управления состоит в поиске оптимального режима, и объектами управления при этом являются весь технологический процесс и его оборудование. На нижней ступени цель управления — это обеспечение минимальных отклонений технологических 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 СВВ в целом, т.е. рассматривая их как производственные предприятия, возникают другие цели и задачи управления, которые нельзя отнести к отдельным технологическим процессам. Это, например, задачи оперативного управления водообрабатывающими станциями и цехами, организацией водоснабжения и водоотведения, планированием запасов реагентов, хранением побочных продуктов и т. п. Поэтому процесс управления СВВ должен включать еще один уровень, на котором решаются организационные задачи. Он является высшим иерархическим уровнем.

Таким образом, структура управления современными СВВ характеризуется тремя уровнями иерархии (рис. 1.3). Нижний уровень (I) 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 технологическим оборудованием.

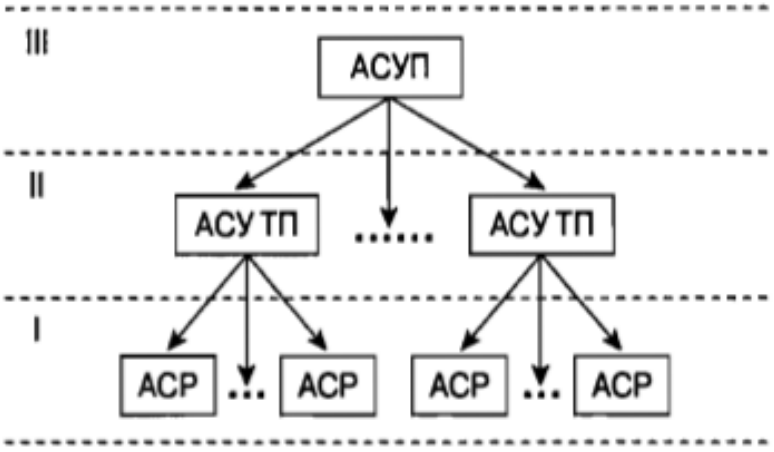


Рис. 1.3. Иерархия управления СВВ (предприятием водообработки)

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 входит 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 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 всей системой транспортирования и обработки воды, т.е. всем предприятием. Например, объектами

управления здесь могут быть производство и потребление питьевой воды, система транспортирования и очистки сточных вод, цех механического обезвоживания осадков (включая вспомогательные службы: снабжения, сбыта, ремонтные, конструкторские, АСУ ТП предыдущего уровня и т.п.). На этом уровне задачи управления всей производственной системой решаются с применением УВМ и обслуживающего персонала. Система этого уровня получила название **автоматизированной системы управления предприятием** (АСУП).

Из сказанного видна роль локальных АСР нижнего иерархического уровня в общем процессе управления современными СВВ: они являются периферийными органами управления, через которые реализуются решения, принимаемые в процессе управления **на** более высоких иерархических уровнях.

1.3. Основные понятия регулирования

Все процессы управления, в том числе и регулирования, имеют общие закономерности, не зависящие от конкретных объектов и целей управления.

Рассмотрим в качестве первого примера, поясняющего эти общие принципы, процесс регулирования уровня в емкости при произвольно изменяющемся потреблении (стоке) жидкости (рис. 1.4). Стабилизировать уровень на заданном значении можно изменением притока жидкости 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.

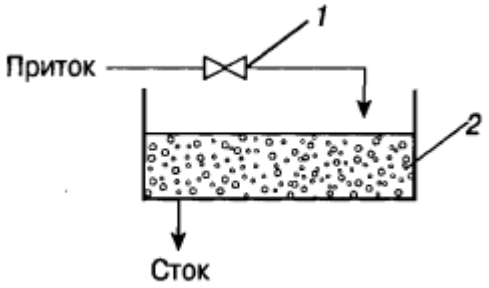


Рис. 1.4. Ручное регулирование уровня с притоком и стоком жидкости: *1* — клапан; *2* — емкость

Таким образом, этот процесс регулирования состоит из пяти составляющих. Во-первых, получение информации о заданном значении уровня. В данном случае это задание известно заранее. 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 значения притока в зависимости от величины и знака отклонения. В-пятых, изменение притока открытием или закрытием клапана.

В приведенном примере процесс управления неавтоматический, так как в нем принимает участие человек. Такое управление называется **ручным.** В АСР процесс управления осуществляется автоматически. Так, регулировать уровень в емкости можно с помощью АСР, показанной на рис. 1.5.

В этой системе поплавок перемещается вместе с уровнем, а клапан изменяет расход жидкости на притоке. Поплавок связан с клапаном через рычаг и шток. В такой АСР любое отклонение уровня от заданного вызвано колебаниями стока, что приводит 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.

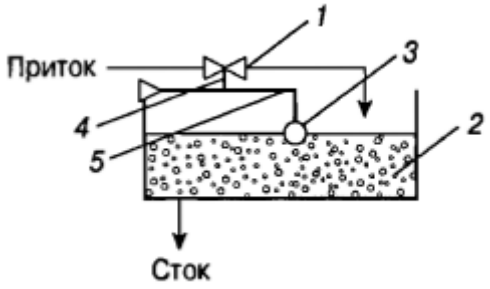


Рис. 1.5. Автоматическое регулирование уровня с притоком и стоком жидкости:
1 - клапан; 2 - емкость; 3 - поплавок; 4 - шток; 5 – рычаг

Теми же пятью составляющими обладают и все другие АСР, например, показанная на рис. 1.2 система управления температурой в метантенке. Из приведенных примеров видно, что для управления любой СВВ необходимо получить информацию о заданном и фактическом ее состоянии, определить отклонение фактического состояния от заданного, на основе этого выработать целенаправленное воздействие на объект и осуществить его.

Несмотря на большое разнообразие встречающихся в СВВ объектов, отмеченный общий характер процессов управления не зависит от природы объектов и технических средств управления. Так, рассмотренные выше системы регулирования уровня и температуры, как и все другие АСР, носят в принципе одинаковый характер. Это позволяет изучать закономерности управления в общем виде, независимо от природы объектов и протекающих в них технологических процессов. Такие общие закономерности изучает **теория автоматического управления** (ТАУ). Рассмотрим ее основные термины и понятия.

Как уже отмечалось, любой процесс управления слагается из пяти основных действий, которые в АСР выполняют технические устройства. Устройство для получения информации о состоянии объекта управления называется **измерительным.** Устройство, определяющее отклонение измеренного значения пара метра от заданного, называется **сумматором.**

Он производит алгебраическое суммирование — вычитание измеренного значения из заданного. Устройство, вырабатывающее воздействие на объект, называется **регулятором.** Для передачи этого воздействия на объект служит **регулирующий орган,** для перемещения которого применяется отдельное устройство — **исполнительный механизм.** Все эти устройства, а также объект управления являются элементами АСР (в ряде систем некоторые из устройств могут быть совмещены, например сумматор может быть частью регулятора, а исполнительный механизм объединен с регулирующим органом). Так, в примере, приведенном на рис. 5, объектом регулирования уровня является емкость с притоком и стоком; измерительным устройством — поплавок; рычаг выполняет роль сумматора и регулятора, а клапан — регулирующего органа.

Из структурной схемы этой АСР (рис. 1.6) видно, что все ее элементы связаны между собой и 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,** физическая природа которых может быть различной: механической, пневматической, электрической. Так, в АСР уровня использована механическая связь регулятора с измерительным устройством и регулирующим органом. Общее свойство всех сигналов — передача воздействия от одного элемента системы к другому. Например, в АСР уровня регулирующий орган воздействует на объект изменением притока, а сигналом служит расход жидкости на притоке. При этом передача воздействия всегда происходит в одном направлении — от предыдущего элемента к последующему. С учетом такой направленности в каждом элементе АСР различают **входные** и **выходные** сигналы. Выходной сигнал является реакцией элемента на входной, т. е. выход элемента всегда зависит от его входа.

Элемент АСР может иметь несколько входных и выходных сигналов. Например, для регулирующего органа в АСР уровня входной сигнал — степень открытия клапана, а выходной — расход жидкости через него. Для емкости (объекта регулирования) входные сигналы — это расходы на притоке и стоке, а выходной сигнал — уровень жидкости. Особое место среди элементов АСР занимает объект регулирования, поскольку характер преобразования в нем сигналов предопределен назначением объекта и, соответственно, сигналы не могут быть изменены. Например, назначение емкости с притоком и стоком — создание запаса жидкости, поэтому в АСР уровня объект рассматривается как элемент с заранее заданными свойствами. Свойства же всех других элементов системы и способы их соединения между собой можно изменять.

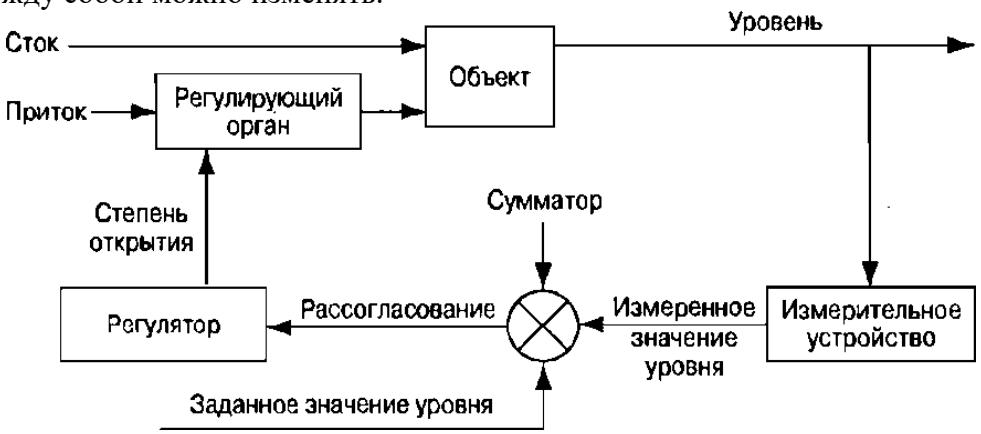


Рис. 1.6. Структурная схема АСР уровня в емкости

Управлять объектом — значит управлять его выходными сигналами, в частности стабилизировать их. Стабилизируемые системы объекта называются **управляемыми (регулируемыми) параметрами.** В СВВ типовыми управляемыми параметрами являются уровень, давление, расход, температура, плотность, концентрация. Заданное значение параметра при его стабилизации называется просто **заданием,** а разность между заданным и измеренным значениями — **рассогласованием,** которое характеризует качество стабилизации.

Для воздействия на выходные сигналы целенаправленно изменяют входные сигналы, которые получили название **управляющих (регулирующих) параметров,** а их целенаправленное изменение — **управляющим (регулирующим) воздействием.** Так, регулируемым параметром емкости является уровень жидкости, а регулирующим — расход на притоке. Наиболее распространенными управляющими параметрами в СВВ являются расходы веществ (жидкостей, паров, суспензий, осадков) и энергии (тепловой, электрической и т. п.).

Реальные объекты всегда подвергаются действию возмущений, которые нарушают нормальный технологический режим в СВВ. Так, при регулировании уровня жидкости основные возмущения — это колебания стока, которые приводят к отклонению уровня от заданного значения. Другой пример: для метантенка, в котором температура стабилизируется подачей пара, возмущениями являются колебания температуры наружного воздуха, пара и т.п. Общее свойство любых возмущений — воздействие на элементы АСР, что вызывает случайные изменения их выходных сигналов. Поэтому возмущения всегда являются входными сигналами элементов.

1.4. Виды автоматических систем регулирования

Как уже отмечалось, отклонение фактического технологического режима от заданного происходит под действием возмущений, для компенсации которых предназначены АСР технологических параметров. Процесс регулирования в АСР может осуществляться двумя способами или их комбинацией.

В основе первого способа лежит идея компенсации возмущений на входе объекта, поэтому он и получил название способа регулирования по возмущению. Структурная схема такой АСР приведена на рис. 1.7, *а.* В этой системе регулирующий параметр *Y*изменяется в зависимости от возмущения *Z* таким образом, что регулирующее воздействие компенсирует действие возмущений на объект. Например, этим способом можно стабилизировать уровень в емкости, для чего расход жидкости на притоке следует поддерживать равным ее расходу на стоке. В этом случае возмущающее действие колебаний стока будет устраняться и уровень не изменится.

В СВВ системы регулирования по возмущению, которые иногда называют разомкнутыми, применяют крайне редко. Это связано с тем, что в таких АСР нет контроля за рассогласованием, и поэтому оно может бесконтрольно увеличиваться под действием неучтенных возмущений. Так, отклонение уровня в емкости от заданного с течением времени может возрасти вследствие неточного измерения расхода, испарения жидкости с поверхности и т.д. В то же время регулирование по возмущению позволяет устранить возмущающие воздействия на входе объекта до возникновения рассогласования, что является достоинством этого способа регулирования.

Сущность второго способа регулирования состоит в том, что регулирующий параметр изменяют в зависимости от отклонения регулируемого параметра от задания. По этому способу, названному регулированием по отклонению, при любом рассогласовании, вызванном возмущающими воздействиями, регулирующее воздействие всегда стремится уменьшить рассогласование.

Регулирование по отклонению иллюстрируется схемой (рис. 1.7, б), в соответствии с которой регулируемая величина *X* сравнивается с заданным значением У: разность этих двух величин ε = *Y* — *X* после усиления воздействует на объект регулирования *ОУ.* Величина е, называемая отклонением или ошибкой АСР, должна быть мала. Тогда между регулируемой величиной А и ее заданным значением У устанавливается вполне определенное соответствие: изменение величины У сопровождается соответствующим изменением регулируемой величины *X.*

Из схемы этой АСР видно, что сигналы в ней проходят по замкнутому контуру: от регулятора на вход объекта — в прямом направлении, а с выхода — в обратном. Такая связь, называемая **обратной,** замыкает выход (регулируемый параметр) с ее входом (заданием), и поэтому АСР с обратной связью является **замкнутой.** В таких системах регулирующее воздействие — реакция на рассогласование, возникающая после появления рассогласования, что является серьезным недостатком способа регулирования по отклонению. В то же время регулирование с использованием обратной связи уменьшает возникающее рассогласование и тем самым компенсирует результат действия возмущений (но не сами возмущения). При таком регулировании не требуется информации об источнике, характере и величине возмущений. Благодаря этому важному свойству обратной связи можно управлять любыми реальными процессами в СВВ при неизвестных возмущениях, т.е. АСР по отклонению имеет большое преимущество перед АСР по возмущению.

Возможно одновременное применение способов регулирования по отклонению и возмущению. Схема такой **комбинированной** АСР (рис. 1.7, *в)* отличается от АСР по отклонению тем, что в регулятор кроме сигнала рассогласования вводится значение возмущения Z. В этой системе основные возмущения компенсируются регулирующим воздействием, как и в АСР по возмущению. Рассогласование же возникает под действием оставшихся (не основных) возмущений, а также ошибок измерения и неточной компенсации основных возмущений. Следовательно, в комбинированной АСР рассогласование будет меньше, чем в АСР по отклонению. Поэтому такие АСР обеспечивают большую точность регулирования, но они более сложны.

Сравнивая описанные способы регулирования, можно сделать следующие выводы. Регулирование по возмущению в принципе может полностью устранить рассогласование, т.е. сделать АСР нечувствительной к возмущениям. Однако для этого требуются идеально

точное измерение и компенсация всех возмущений, что практически невозможно. Поэтому такой способ применяется обычно как дополнение к регулированию по отклонению в комбинированных АСР для улучшения их свойств. Для регулирования же по отклонению не требуется информации о возмущениях, поэтому такой способ легко реализуется на практике с помощью обратной связи. Однако по этой же причине в АСР с обратной связью рассогласование принципиально не может быть устранено полностью, ибо регулирующее воздействие на объект осуществляется лишь после возникновения рассогласования, т.е. как бы запаздывает во времени.

Если бы можно было заранее предвидеть возмущения и реакцию на них объекта, то стало бы возможным формирование регулирующего воздействия с необходимым предварением, чтобы не допустить рассогласования. Оказывается, что о будущем поведении объекта можно судить по скорости изменения рассогласования. Действительно, если в каждый текущий момент времени измеряется не только само рассогласование, но и скорость его изменения, то можно рассчитать (предсказать) рассогласование на следующий, будущий момент. Тогда на вход регулятора АСР подается не текущее, а предсказанное рассогласование, в результате чего регулирующее воздействие производится с необходимым предварением, что позволяет еще больше уменьшить рассогласование. Системы, использующие эффект предсказания, называются **АСР с предварением.**

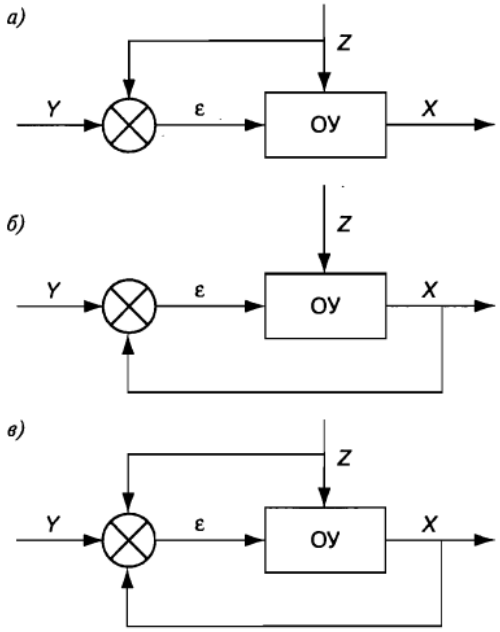


Рис. 1.7. Схемы регулирования по возмущению (а), отклонению (б), комбинированная (в)

АСР классифицируют не только по способу регулирования, но и по характеру сигналов регулирующего воздействия и сигналов задания. По характеру сигналов регулирующего воздействия различают непрерывные и дискретные АСР. В **непрерывных** регулирующее воздействие может изменяться непрерывно, в дискретных — скачками: либо в определенные моменты времени (дискретность во времени), либо только на определенное значение (дискретность по значению). В первом случае АСР называется **импульсной,** во втором — **релейной.**

Импульсные АСР обычно применяют, когда регулируемый параметр измеряется дискретно во времени (например, измерение концентрации компонента в природных и сточных водах путем периодического отбора проб на анализ). В этом случае регулирующий параметр обычно изменяется также дискретно.

В релейных АСР регулируемый параметр может принимать лишь несколько возможных значений. Системы с двумя значениями называются **двухпозиционными,** с тремя — **трехпозиционными.** Например, при регулировании температуры в метантенках регулиру-

ющий параметр имеет два значения — электромагнитный клапан на паропроводе либо «открыт», либо «закрыт».

Задание в АСР может быть постоянной величиной или изменяться во времени. В соответствии с этим АСР делятся на стабилизирующие, программные и следящие. В **стабилизирующих** АСР задание является постоянной величиной, в **программных** — изменяется по определенному, заранее заданному закону, в **следящих** — произвольно. Примером стабилизирующей АСР может служить система регулирования температуры, которая должна изменяться по определенному закону во времени. Пример следящей АСР — система регулирования расхода воздуха, подаваемого в форсунку для сжигания метана, образующегося при анаэробном сбраживании осадков сточных вод. Для обеспечения оптимального режима горения задание на расход этого воздуха изменяют пропорционально расходу метана.

Мы рассмотрели АСР, в которых один регулируемый и один регулирующий параметр. В замкнутых АСР они связаны в один контур, образованный прямой и обратной связями, поэтому такие АСР называют **одноконтурными** или **односвязными.** С помощью односвязных АСР не всегда можно достичь требуемого качества управления, поскольку они не учитывает влияния друг на друга параметров различных АСР. Поэтому применяют так называемое **связанное регулирование,** которое осуществляется **многоконтурными** АСР. Эти системы представляют собой совокупность одноконтурных АСР, связанных между собой дополнительными перекрестными сигналами.

1.5. 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. К нему можно подключить регистрирующий прибор (РП), который записывает динамику изменения технологических параметров (рис. 1.8). 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.

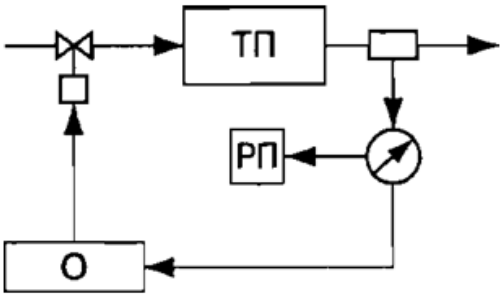


Рис. 1.8. Схема системы автоматической индикации

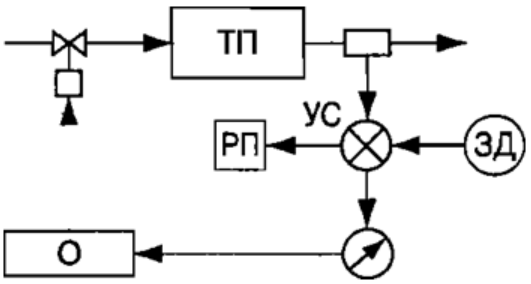


Рис. 1.9. Схема системы автоматического контроля

Технические усовершенствования позволили перейти от автоматической индикации к автоматическому контролю, при котором 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. 9. Таким образом, задачей **контроля** является обнаружение событий, определяющих ход того или иного процесса. В случае, когда эти события обнаруживаются без участия человека, контроль называют автоматическим.

Важнейшей составной частью контроля является измерение физических величин, характеризующих протекание процесса, которые называют **параметрами процесса.**

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 величины Q в принятой единице измерения, то результат измерения величины Q может быть представлен следующим равенством:

$$Q = q[Q] \qquad (1.1)$$

Уравнение (1.1) называют основным уравнением измерения. Из него следует, что значение q зависит от [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 в соответствии с ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). «Единицы величин» действует Международная система единиц измерения, которая сокращенно обозначается СИ. 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 измерения, называют входным сигналом, получаемый на выходе — **выходным сигналом** средства измерений.

1.6. Измерительные преобразователи и приборы

Измерительный преобразователь — это средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем (в практике автоматизации СВВ часто применяется термин «датчик»). Преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т.е. первый элемент в измерительной цепи, называется первичным измерительным преобразователем (рис. 1.10). Например, электрод сигнализатора уровня, сужающее устройство (диафрагма) для измерения расхода и т.п.



Рис. 1.10 Блок-схема измерительной цепи: О — объект измерения; ПП — первичный преобразователь (датчик); ПрП — промежуточный преобразователь; ИП — измерительный прибор

В системах автоматического контроля применяют 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.**

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, предназначенных для построения автоматических систем измерения, контроля, регулирования, диагностики и управления технологическими процессами. Номенклатура технических средств ГСП дает возможность создавать самые разнообразные, любой сложности системы автоматического регулирования и управления из стандартизованных средств измерения и средств автоматизации.

В зависимости от вида энергии питания, входных и выходных сигналов ГСП разделяют на электрическую, пневматическую и гидравлическую ветви. В СВВ применяют в основном средства первых двух ветвей ГСП, которыми предусмотрены общепромышленные 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 и др.).

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 аппарате и передача его по импульсной трубке для измерения к манометру). **Импульсной трубкой** называют трубопровод небольшого диаметра (обычно от $1/_2$ до 2"), 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 АСР, называется **измерительной системой.**

В показывающих приборах измерительная информация воспроизводится положением стрелки или какого-либо другого указателя относительно 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 значением.

1.7. 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. Погрешности измерения в зависимости от их происхождения разделяются на три группы: систематические, случайные и субъективные.

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

Инструментальные погрешности являются следствием конструктивных и технологических погрешностей, а также износа средств измерений.

Конструктивные погрешности вызваны несовершенством конструкции или неправильной технологией изготовления средств измерений. Плохая балансировка механизма, неточности при нанесении отметок шкалы, некачественная сборка прибора влияют на **технологическую погрешность.** Конструктивная погрешность приборов одного типа постоянна, технологическая — 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 быть вызваны: 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, зависят от вибрации, электромагнитных полей, конвекции 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 термоЭДС. Поэтому не рекомендуется устанавливать приборы вблизи источников тепла. **Методические погрешности** возникают в результате несовершенства методов измерений и теоретических допущений (использование приближенной зависимости вместо точной). 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 устраняют 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 прибора, неправильного режима работы электронных устройств и по многим другим, трудно объяснимым причинам. Знак случайных погрешностей выражается в виде ±.

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

Различают абсолютные и относительные погрешности измерения. **Абсолютная погрешность** Δ — это разность между измеренным X и истинным $X_И$ значениями измерений, которая выражается в единицах измеряемой величины:

$$\Delta = X - X_И \quad (1.2)$$

Поскольку истинное значение измеряемой величины определить невозможно, на практике используют действительное значение измеряемой величины Хд, которое находят экспериментально по показаниям образцовых средств измерений. Таким образом, абсолютную погрешность находят по формуле

$$\Delta \approx X - X_Д \quad (1.3)$$

Относительная погрешность δ — это отношение абсолютной погрешности измерения к истинному (действительному) значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta = \pm(\Delta/X_И)\cdot 100 \approx \pm(\Delta/X_Д)\cdot 100 \quad (1.4)$$

Абсолютная погрешность измерительного прибора $\Delta_П$ - это разность между показанием Хп прибора и истинным значением измеряемой величины. Поскольку, как указывалось выше, истинное значение величины остается неизвестным, на практике вместо него пользуются действительным значением величины Хд, отсчитанным по образцовому прибору. Таким образом,

$$\Delta_П \approx X_П - X_Д \quad (1.5)$$

Относительная погрешность измерительного прибора $\delta_П$ — это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой величины. Относительную погрешность $\delta_П$ выражают в процентах:

$$\delta_П = \pm(\Delta_П/X_Д)\cdot 100 \quad (1.6)$$

Приведенная погрешность измерительного прибора $\upsilon_П$— это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению (обычно выражается в процентах):

$$\upsilon_П = \pm(\Delta_П/X_N)\cdot 100 \quad (1.7)$$

Нормирующее значение X_N — условно принятое значение, которое может быть равным верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы и др. Как правило, за нормирующее значение принимаются: конечное значение диапазона измерений (для приборов, имеющих нулевую отметку на краю шкалы); арифметическая сумма конечных значений диапазона измерений (для приборов, имеющих двустороннюю шкалу, т.е. нулевую отметку в середине шкалы); например, для термометра со шкалой от -50 до +50 °С величина X_N будет определяться суммой 50+50=100; разность конечного и начального значений диапазона измерений для приборов со шкалами без нуля (так называемые шкалы с «подавленным нулем»); например, для прибора со шкалой 30—160 ^{0}С величина X_N будет определяться разностью:

160 - 30 = 130.

Абсолютная и относительная погрешности в соответствии с выражениями (1.5)—(1.7) связаны с приведенной следующими соотношениями:

$$\Delta = \upsilon_П \cdot X_N/100 \quad (1.8)$$

$$\delta = \upsilon_П \cdot X_N/100 \quad (1.9)$$

На показания приборов оказывают значительное влияние внешние факторы, называемые **влияющими величинами.** Область значений влияющей величины, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерения данного вида в качестве нормальной для этих средств измерений, называется **нормальной областью значений.** При нормальном значении влияющей величины погрешность средств измерений

минимальна. Условия применения средств измерений, при которых влияющие величины (температура и влажность окружающей среды, характер вибрации, напряжение питания, величина внешнего магнитного и электрического поля и т.д.) находятся в пределах нормальной области значений, называются **нормальными условиями применения средств измерений.** Нормальные условия указываются в технических условиях заводов — изготовителей приборов.

1.8. Класс точности средств измерений

В зависимости от основной погрешности средствам измерений присваивают 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 устанавливают в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Средства измерений выпускают на следующие классы точности: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,04; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0. 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 понимают качество измерений, отражающее близость нулю его 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 измерений называется наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, 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 латинского 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.

При выражении предела основной допускаемой погрешности в форме приведенной погрешности класс точности обозначается числами, которые равны этому пределу, выраженному в процентах. При этом обозначение класса точности зависит от способа выбора нормирующего значения. Если нормирующее значение выражается в единицах измеряемой величины, то класс точности обозначается числом, совпадающим с приведенной погрешностью.

Например, если v_n = 1,5%, то класс точности обозначается 1,5 (без кружка!). Если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части, то обозначение класса точности (при v_n = = 1,5%) будет иметь вид 1,5 (в кружке).

При выражении предела допускаемой основной погрешности в форме относительной погрешности необходимо руководствоваться следующим.

Предел допускаемой основной погрешности согласно выражению (1.6)

$$\delta_д = \pm(\Delta_д/X) \cdot 100 \qquad (1.10)$$

где $\Delta_д$ — предел допускаемой абсолютной погрешности; *X* — измеренное значение.

В том случае, когда предел относительной погрешности остается постоянным во всем диапазоне измерений, выражение (1.10) принимает вид:

$$\delta_{g=} \pm (\Delta_д/X) \cdot 100 = \pm c \qquad (1.11)$$

где c — постоянное число.

Если же предел относительной погрешности изменяется, то

$$\delta_{g=} \pm \left(\frac{\Delta_д}{X}\right) \cdot 100 = \{c + d \cdot \left[\left(\frac{X_K}{X}\right) - 1\right]\} \quad (1.12)$$

где c — постоянное число, равное относительной погрешности на верхнем пределе измерения; d — постоянное число, равное погрешности на нижнем пределе измерения, выраженной в процентах от верхнего предела; $X_к$ — конечное значение диапазона измерений.

Примеры обозначений класса точности средств измерений представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Примеры обозначения класса точности средств измерений

Форма выражения погрешности	Предел допускаемой основной погрешности (форма представления)	Предел допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на приборах
приведенная	по формуле (1.7), если нормирующее значение определяется в единицах измеряемой величины	±1,0	класс точности 1,0	1,0
	То же, если нормирующее значение определяется длиной шкалы или ее частью	±0,25	класс точности 0,25	0,25V
относительная	по формуле (1.11)	±0,2	класс точности 0,2	0,2 (в кружке)
	по формуле (1.12) $\delta_{g=} \pm \{0{,}02 + 0{,}01 \cdot \left[\left(\frac{X_K}{X}\right) - 1\right]\}$		класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
абсолютная	по формуле $\Delta_g = \pm a$ или $\Delta_g = \pm(a + bX)$, где Δ_g- предел допускаемой абсолютной основной погрешности; X – значение измеряемой величины; a и b – положительные числа, не зависящие от X	-	класс точности M	M

РАЗДЕЛ 2. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Главной целью при изучении данного раздела является получение общетеоретических сведений о системах водоснабжения городов и населенных пунктов, их классификации, определения расчетных расходов.

Целью изучения раздела является изучение элементов комплекса системы водоснабжения, обретения навыков по определению суточных и часовых расходов воды, определению свободных напоров, проведению гидравлических расчетов.

Темы раздела:

Измерение давления и разности давлений
Измерение расходов газов и жидкостей
Измерение уровней жидкостей
Измерение температуры
Измерение качественных параметров питьевых и сточных вод

2.1. Измерение давления и разности давлений

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 применении этой единицы могут использоваться приставки для образования кратных и дольных единиц — в первую очередь с целью сокращения числа значащих цифр в записываемом значении (например, 5,28 МПа вместо 5 280000 Па).

Измерение давления отечественными приборами производится в кгс/см^2 (килограмм-сила на сантиметр квадратный) и кгс/м^2 (килограмм-сила на метр 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). Соотношения между применяемыми единицами измерения давления приведены в табл. 3.1.

Таблица 2.1. Соотношения между единицами давления

Единица	Па	кгс/м^2	кгс/см^2	мм.вод.ст.	мм.рт.ст.
Па	1	0,10197	$10,197 \cdot 10^{-6}$	0,10197	$7,50 \cdot 10^{-3}$
кгс/м^2	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$
кгс/см^2	$98,0665 * 10^3$	104	1	104	735,56
мм.вод.ст.	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$
мм.рт.ст.	133,322	13,595	$13,595 \cdot 10^{-4}$	13,595	1

При измерении давления различают абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление. Под термином **«абсолютное давление»** подразумевают полное давление, под которым находится жидкость или газ. Оно равно сумме давлений — избыточного (Ри) и атмосферного (Ра):

$$P = Р_И + Р_а \quad (2.1)$$

или

$$Р_И = P - Р_а \quad (2.2)$$

т. е. **избыточное давление** равно разности между абсолютным давлением, бóльшим атмосферного, и атмосферным давлением.

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

$$Р_в = Р_а - Р \quad (2.3)$$

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

- **барометры** — для измерения атмосферного давления (отсюда атмосферное давление иногда называют барометрическим);
- **манометры абсолютного давления** — для измерения абсолютного давления;
- **манометры избыточного давления** — для измерения избыточного давления (сокращенно в практике их обычно называют манометрами);
- **вакуумметры** — для измерения вакуумметрического давления, т.е. давления ниже атмосферного (в практике применяется термин «разрежение»);
- **напоромеры и тягомеры** — для измерения малого (до 40 кПа) избыточного давления и вакуумметрического давления (разрежения) газовых сред;
- **моновакуумметры** — для измерения избыточного и вакуумметрического давлений одновременно;
- **тягонапоромеры** — для измерения малых (до 40 кПа) давлений и разрежений газовых сред одновременно;
- **дифференциальные манометры (дифманометры)** — 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 — $Р_1$ и $Р_2$ и вырабатывают сигнал, пропорциональный их разности. У манометров избыточного давления, вакуумметров, тягомеров и напоромеров давление $Р_2$ обычно равно атмосферному. Дифманометры 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. 2.1) всех систем заполняются жидкостью таким образом, чтобы над ней образовались 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. 2.1, 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 двусторонняя 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 h в обеих трубках, что не всегда удобно. 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. 2.1, 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.

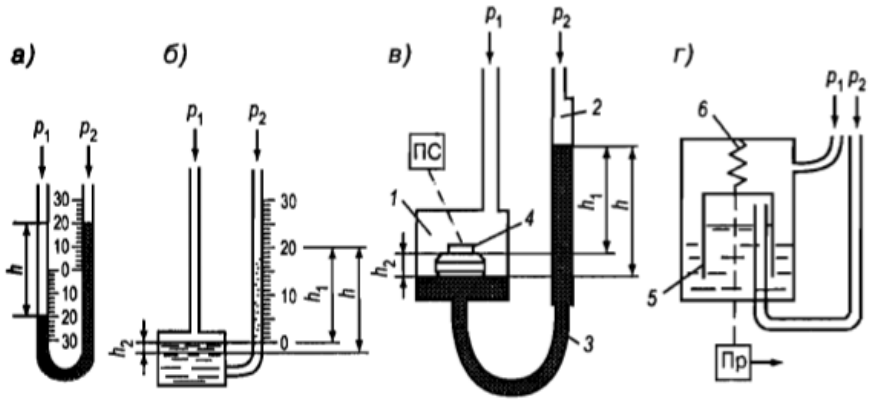


Рис. 2.1. Жидкостные манометры: а—U-образный (двухтрубный); б—чашечный (однотрубный); в —поплавковый; г — колокольный

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

$$h=h_1+h_2 \qquad (2.3)$$

Если F_1 — площадь сечения измерительной трубки, а F_2 — широкого сосуда, то

$$F_1h_1= F_2h_2 \qquad (2.4)$$

поскольку объем жидкости в измерительной трубке равен объему жидкости, вытесненной из широкого сосуда.

Решив уравнения (2.3), (2.4) относительно h, получим:

$$h = h_1\left(1 + \frac{F_1}{F_2}\right) = h_1 \cdot (1 + d^2/D^2) \qquad (2.5)$$

Величиной $d^2/D^2 > 1/400$ ввиду ее малости обычно пренебрегают и отсчет ведут по столбу жидкости h_1 только в одной измерительной трубке, что упрощает измерение по сравнению с U-образным манометром. При цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба может быть произведен с погрешностью, не превышающей ±1 мм столба рабочей жидкости.

Поплавковые манометры (рис. 11, *в)* работают по принципу рассмотренных выше чашечных манометров.

В поплавковом манометре имеются два U-образных сосуда *1* и *2,* соединенных трубкой *3.* Большое 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 $\Delta p = p_1 - p_2$ передается стрелке отсчетного (П) или регистрирующего (С) устройства прибора.

В колокольных манометрах (рис. 2.1, 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 $(p_1 - p_2)$ колокол и кинематически связанная с ним подвижная часть передающего преобразователя Пр перемещаются до тех пор, пока усилие от приложенной к колоколу разности давлений не уравновесится упругими силами винтовой пружины. Пе-

ремещение подвижной части передающего преобразователя приводит к изменению выходного сигнала.

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 и сильфоны.

Одними из наиболее распространенных в практике измерений давления являются трубчато-пружинные манометры с одновитковой трубчатой пружиной (рис. 2.2, *а).* Трубчатая пружина представляет собой изогнутую трубку, имеющую эллиптическое или плоскоовальное поперечное сечение (такие пружины называют трубками Бурдона). 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 p_1 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. 2.2 изображен манометр П, имеющий передающий преобразователь Пр).

Некоторые модификации манометров снабжены контактным устройством, срабатывающим при достижении измеряемой величиной заданного значения. Такие приборы называют электроконтактными манометрами.

В мембранных манометрах упругий чувствительный элемент выполняется в виде мембранной коробки (рис. 2.2, *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. 2.2, *в)* упругий чувствительный элемент выполнен в виде сильфона *1,* 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 С.

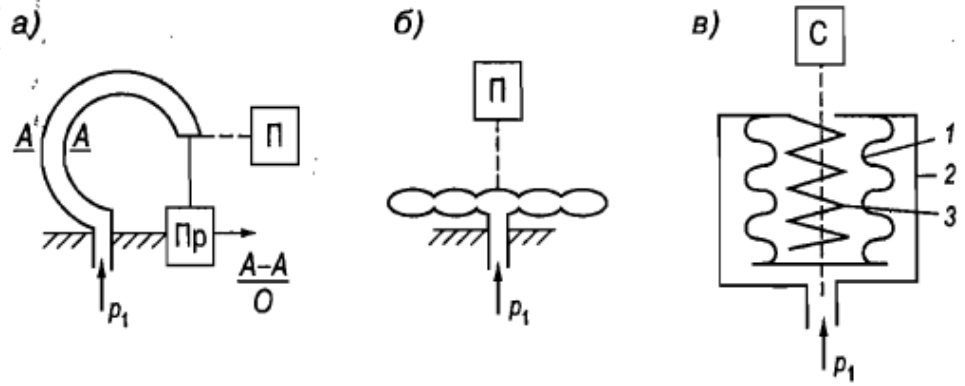


Рис. 2.2. Манометры с упругим чувствительным элементом (деформационные): а — трубчато-пружинный; б — мембранный; в — сильфонный

Принципиальные схемы деформационных манометров представлены на рис. 13. У мембранного дифманометра ДМ упругим чувствительным элементом является мембранный

блок (рис. 2.3, *а),* состоящий из двух заполненных дистиллированной водой мембранных коробок *1* и *3,* закрепленных с обеих сторон в основании *2,* которое с верхней и нижней крышками корпуса образует 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 $\Delta p = p_1 - p_2$ нижняя мембранная коробка сжимается, вытесняя находящуюся в ней воду в верхнюю коробку *3.* Последняя расширяется, что воспринимается передающим преобразователем *Пр.*

Чувствительным элементом дифманометра, представленного на рис. 2.3*, б,* является вялая (мягкая) неметаллическая мембрана *4* с жестким центром 5, работающая совместно с винтовой цилиндрической пружиной 7. Мембрана, укрепленная между двумя крышками корпуса прибора, образует две камеры, в которые подводятся давления p_1 и p_2. Под действием разности давлений жесткий центр мембраны и связанный с ним шток *6* сердечника преобразователя *Пр* перемещаются до тех пор, пока сила, вызываемая разностью давлений, не уравновесится силой упругости винтовой пружины 7. Преобразователь *Пр* вырабатывает сигнал измерительной информации, пропорциональный измеряемой разности давлений.

У сильфонного дифманометра типа ДСС (рис. 2.3, *в)* чувствительный элемент состоит из расположенных на общем основании двух сильфонов *8* и *10,* донышки которых жестко связаны штоком *9,* а внутренние полости заполнены кремнийорганической жидкостью. Под действием разности давлений $\Delta p = p_1 - p_2$сильфоны начинают деформироваться, вызывая перемещение штока, кинематически связанного с компенсационным преобразователем *Пр.*

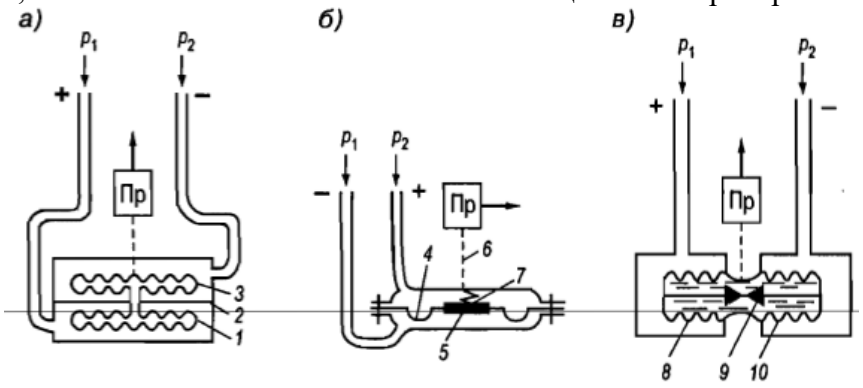


Рис. 2.3. Дифференциальные манометры с упругим чувствительным элементом (деформационные): а — мембранный; б — с вялой мембраной; в — сильфонный

2.2. Измерение расходов газов и жидкостей

Расход вещества определяется его количеством, проходящим в единицу времени через данное сечение канала (например, трубопровода). Различают массовый расход Q_M и объемный расход, обозначаемый через Q_0 (или Q_v).

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), равный массовому расходу, при котором через определенное сечение за время 1 с равномерно перемещается вещество

массой 1 кг.

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), равный объемному расходу, при котором через определенное сечение за время 1 с равномерно перемещается вещество объемом $1м^3$. Внесистемными единицами, широко распространенными на практике, 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 = 3,60 • 10^3 кг/ч = 3,60 т/ч;

объемный — 1 $м^3$/с = 60 $м^3$/мин = 3,60 • 10^3 $м^3$/ч = 10^3 л/с = = 3,60 • 10^3 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 $p_{ном}$ = 101325 Па (1,0332 кгс/$см^2$); относительная влажность φ = 0.

Объемный расход газа, приведенный к нормальному состоянию, обозначают через $Q_{ном}$ и выражают в $м^3$/ч. *Недопустимо выражать расход вещества в кг/с, Н/с, дин/с* (т. е. единицах силы в единицу времени), в $нм^3$/ч (т.е. в так называемых нормальных кубических метрах в единицу времени). Указание на вид измеряемой величины — объемный расход газа при нормальных условиях — должно входить в наименование этой величины (например, $Q_{ном}$), а не в обозначение единицы величины. Для перевода массового расхода в объемный и объемного в массовый используют выражения

$$Q_0 = \frac{Q_M}{\rho} \text{ и } \quad Q_M = Q_0 \cdot \rho \tag{2.6}$$

где ρ — плотность вещества, кг/$м^3$.

Устройство для измерения количества вещества, протекающего через 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 применяют 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:

$$\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \left[\left(\frac{p}{\gamma}\right) + z\right] = const \tag{2.7}$$

где $\left[\left(\frac{p}{\gamma}\right) + z\right]$ — удельная потенциальная энергия (давление) жидкости; $\frac{v^2}{2g}$ — удельная кинетическая (скоростная) энергия.

Согласно принципу неразрывности поток протекающего в трубопроводе вещества во всех сечениях одинаков, следовательно, в один и тот же момент 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 v^2 повышается по сравнению со скоростью потока до сужения v_1. 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. 2.4, а), зависящий от скорости потока и, значит, расхода среды.

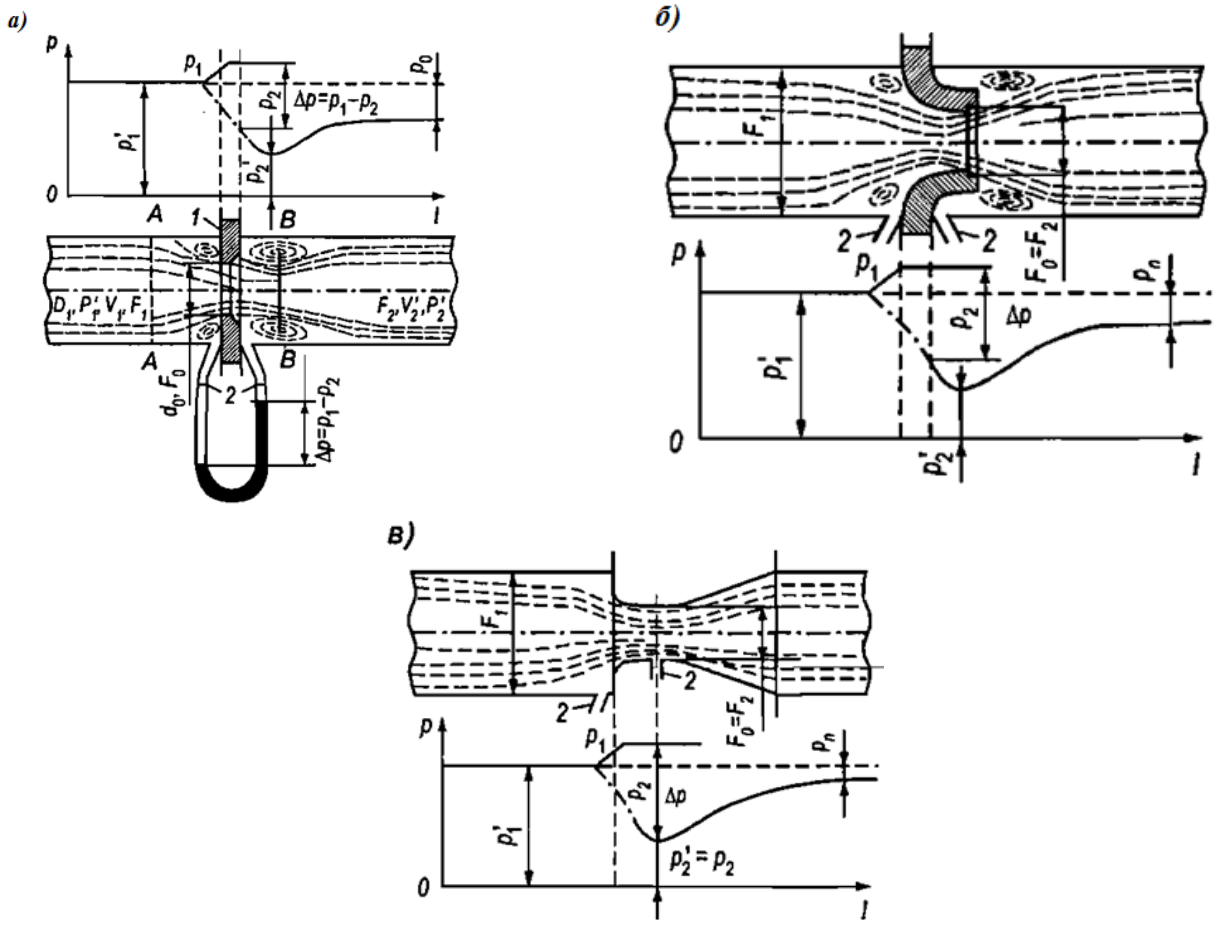


Рис. 2.4. Характер потока и распределения статического давления при установке в трубопроводах диафрагмы (в), сопла (б) и сопла Вентури (в)

Следовательно, перепад давления, создаваемый сужающим устройством, может служить мерой расхода вещества, а численное значение этого расхода может быть определено по перепаду давления Δp, измеренному дифманометром. 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,** удовлетворяющие требованиям «Правил измерения расхода массы и объема природного газа стандартными сужающими устройствами. Измерение расхода текучих сред методом переменного перепада давления с помощью сужающих устройств и применяющиеся для измерения расхода веществ без их индивидуальной градуировки». К нестандартным сужающим устройствам относятся **сегментные диафрагмы, диафрагмы с коническим входом, сопла с профилем «четверть круга»** и другие, применяемые в особых случаях (например, для загрязненных сточных вод и их осадков) и требующие индивидуальной градуировки, так как на их использование нет утвержденных норм.

Диафрагма (рис. 2.4, *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. Затем поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Кривая, характеризующая распределение давлений вдоль стенки трубопровода, представлена сплошной линией (рис. 2.4, *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 на величину давления оказывают незначительное влияние. 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 подключают импульсные соединительные линии, идущие к измерительному прибору.

Сопло (рис. 2.4, *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_1 и p_2 осуществляется так же, как и у диафрагмы.

Сопло Вентури (рис. 2.4, *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 соединена 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. В общем виде массовый (кг/с) и объемный ($м^3$/ч) расходы газов и жидкостей вычисляют по формулам:

$$Q_M = \alpha\varepsilon F_0\sqrt{2\Delta p\rho} = \alpha\varepsilon\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)\sqrt{2\Delta p\rho} \quad (2.8) \qquad Q_0 = \alpha\varepsilon F_0\sqrt{2\Delta p\rho} = \alpha\varepsilon\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)\sqrt{2\Delta p/\rho} \quad (2.9)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$— перепад давления в сужающем устройстве, Па; d — диаметр отверстия сужающего устройства при температуре измеряемой среды, мм; ρ — плотность среды в рабочих условиях, кг/$м^3$; α — коэффициент расхода, определяемый в зависимости от типа сужающего устройства (величина безразмерная); ε — безразмерный поправочный множитель на расширение измеряемой среды, определяемый экспериментально (для несжимаемой жидкости ε = 1).

Для контроля за расходом жидкостей в открытых каналах по методу переменного уровня применяется нормализованный лоток Вентури (рис. 2.5), в котором расход, как и в других случаях, измеряется дифманометрами.

В расходомерах постоянного перепада давления, называемых расходомерами обтекания, чувствительным элементом (рис. 2.6) является поплавок *1,* воспринимающий

динамическое давление обтекающего его потока. Принцип действия таких расходомеров заключается в том, что при движении измеряемой среды снизу вверх чувствительный элемент (поплавок) перемещается, изменяя площадь проходного отверстия, до тех пор, пока вертикальная составляющая силы, действующей на поплавок, не уравновесится его весом. При этом разность давлений на чувствительный элемент (перепад давления по обе стороны поплавка) останется постоянной. Таким образом, противодействующей силой в расходомерах этого вида является сила тяжести чувствительного элемента, выполняемого в виде поплавка.

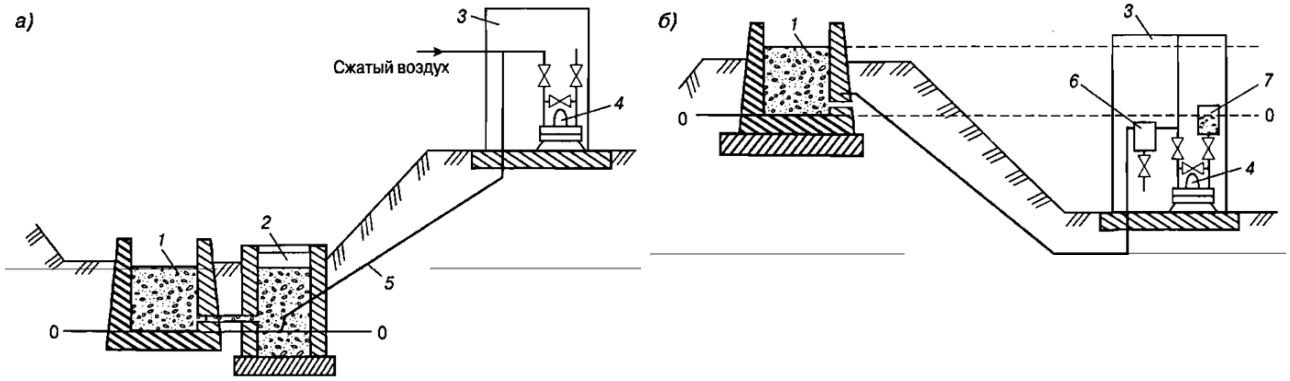


Рис. 2.5. Схемы измерения расхода жидкости в лотке Вентури: а — с пневматическим контролем уровня; б — с гидравлическим контролем уровня; 1—лоток; 2—измерительная камера; 3—приборное помещение; 4 — дифманометр; 5 — пьезотрубка; 6 — отстойник; 7 — уравнительный сосуд

Сила любого сопротивления чувствительного элемента определяется зависимостью

$$F = \zeta S\left(\frac{v^2}{2}\right)\rho \qquad (2.10)$$

где ζ — коэффициент лобового сопротивления; S — площадь гидродинамического сечения чувствительного элемента; v — скорость движения среды относительно чувствительного элемента; ρ — плотность измеряемой среды

Расходомер постоянного перепада давления с поплавком 1 (см. рис. 2.6), перемещающимся вдоль длинной конической трубки 2, называется **ротаметром**. Трубка ротаметров для местного измерения расхода выполняется из стекла или металла, а значение расхода отсчитывается непосредственно по шкале, нанесенной на ее стенке (соответственно ротаметры стеклянные типа РС и металлические типа РМ). У ротаметров с дистанционной передачей поплавок связан с передающим преобразователем (пневматическим или электрическим). Например, в электрических ротаметрах типа РЭ и РЭВ широко используются дифференциально-трансформаторные преобразователи.

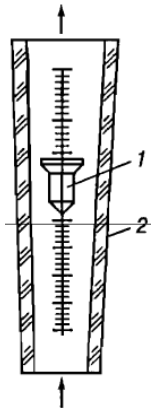


Рис. 2.6. Расходомер постоянного перепада давления (ротаметр)

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 (ЭДС) 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 ЭДС, 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 круглом сечении трубопровода величина этой ЭДС равна

$$E=vBd, \qquad (2.11)$$

где v — средняя скорость потока жидкости; B — индукция магнитного поля; d — внутренний диаметр трубопровода.

Магнитное поле электромагнитного расходомера типа ИР (рис. 2.7, *а)* внутри участка трубы 7, выполненной из немагнитного материала и покрытой изнутри электроизоляционным слоем, создается электромагнитом 2. В пересекающей магнитное поле жидкости наводится ЭДС. 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.

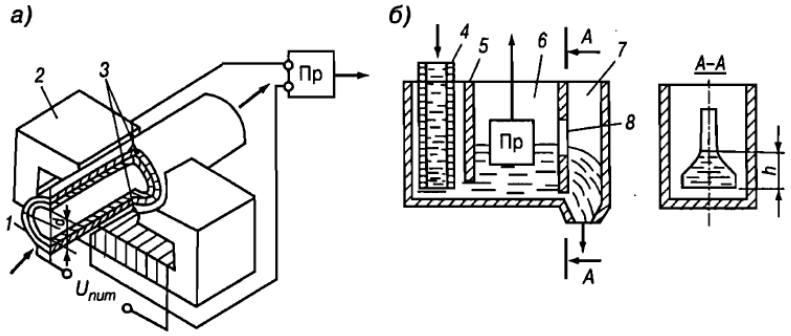


Рис. 2.7. Расходомеры жидкостей и пульп: а - электромагнитный; б - переменного уровня (щелевой)

Принцип действия щелевых расходомеров переменного уровня со сливом типа ЩРП (рис. 2.7, *б)* основан на зависимости уровня жидкости над сливной стенкой *5* от ее объемного расхода Q_0. Для прямоугольного слива с тонкой стенкой справедливо соотношение

$$Q_0 = ab\sqrt{2gh^{3/2}} \qquad (2.12)$$

где a — коэффициент расхода, учитывающий потерю напора и эффект бокового сжатия струи; b — ширина сливной стенки; g — ускорение силы тяжести; $И$ — уровень жидкости над сливной стенкой.

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

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

Тахометрическим 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. 2.8) или горизонтальной осью вращения. Под действием потока вещества вертушка *4* на опорном шипе совершает непрерывное вращательное движение с угловой скоростью, пропорциональной скорости потока, а следовательно, и расходу. 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.*

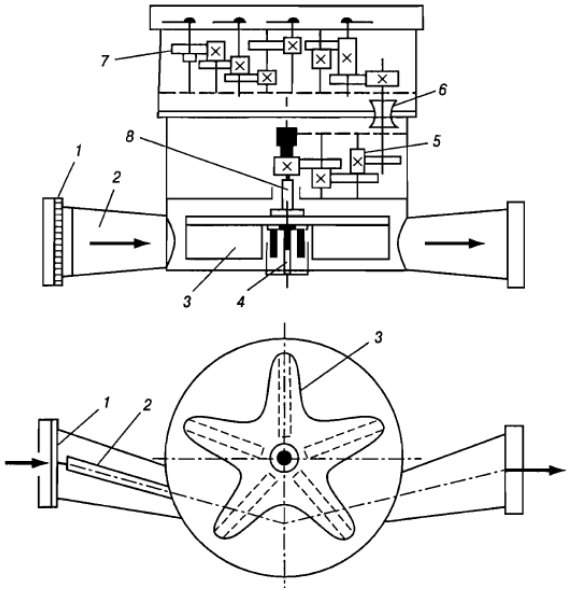


Рис. 2.8. Схема устройства скоростного счетчика количества жидкости с вертикальной осью вращения вертушки

В объемных счетчиках вещество измеряется отдельными равными по объему дозами. В поршневом счетчике (рис. 2.9, *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 положение, показанное на рис. 2.9, *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.

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. 2.9 счетный механизм и указатель не показаны). В СВВ 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.

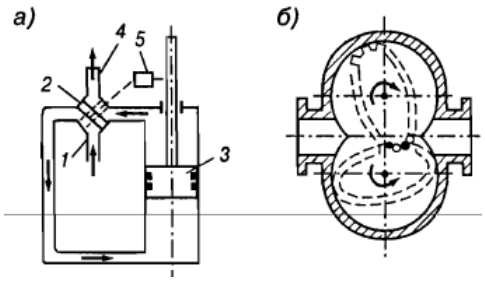


Рис. 2.9. Схема объемных счетчиков

2.3. Измерение уровней жидкостей

При автоматизации СВВ широко применяются технические средства для непрерывного измерения уровня (уровнемеры) и устройства для сигнализации предельных уровней (сигнализаторы уровня, реле уровня). **Уровень измеряется в метрах (м) и миллиметрах (мм).**

Для измерения и регулирования уровня применяются приборы, основанные на разных принципах действия: дифмано- метры-уровнемеры, пьезометрические, поплавковые и емкостные уровнемеры. Если дистанционная передача показаний не требуется, то уровень жидкости с достаточной точностью и надежностью можно измерять или показывающими дифманометрами, принцип действия которых описан выше, или с помощью указательных стекол. Измерение уровня жидкости указательными стеклами основано на принципе действия сообщающихся сосудов.

Принцип действия **поплавковых (буйковых) уровнемеров** основан на использовании выталкивающей силы, действующей на поплавок (буек), погруженный в жидкость. Чувствительным элементом таких уровнемеров (рис. 2.10, *а)* является поплавок 7, плавающий на поверхности жидкости. Перемещение поплавка, вызванное изменением уровня, воспринимается предающим преоб-разователем *Пр*. Следует иметь в виду, что при использовании поплавковых уровнемеров на средах, склонных к налипанию, появляется дополнительная погрешность, связанная с изменением массы поплавков, что приводит к изменению глубины погружения и ограничивает их применение.

Емкостные уровнемеры широко применяют для сигнализации и дистанционного измерения уровня жидких и сыпучих сред. Прин цип действия этих приборов основан на измерении электрической емкости, величина которой зависит от уровня контролируемой среды.

Для электропроводных сред используют первичные преобразователи с одним электродом *2* (рис. 2.10, б), покрытым слоем изоляции *3*. Вторым электродом является измеряемая среда. При изменении уровня меняется величина поверхности обкладки конденсатора, образованного электродом и измеряемой средой, что приводит к изменению его емкости пропорционально изменению контролируемого уровня. Измерение емкости и преобразование ее в пропорциональный изменению уровня выходной сигнал осуществляется промежуточным преобразователем *Пр*, содержащим индуктивно-емкостный мост. Электрический контакт контролируемой среды с измерительной схемой достигается путем заземления одного из входов измерительной схемы и стенок резервуара 4, в котором находится контролируемая среда.

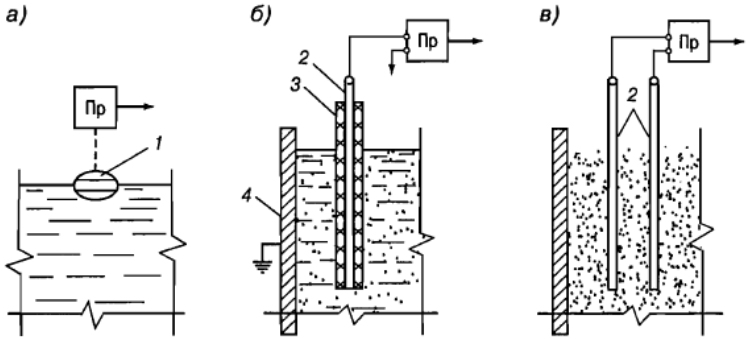


Рис. 2.10. Уровнемеры: а - поплавковый; б - емкостный для электропроводных сред; в - емкостный для неэлектропроводных сред

Для измерения уровня неэлекгропроводных сред (рис. 2.10, *в)* применяют первичный преобразователь с двумя неизолированными электродами *2* (одним из электродов могут быть стенки ре зервуара). Для каждого значения уровня среды в резервуаре емкость первичного преобразователя определяется как емкость из двух параллельно соединенных конденсаторов: один образован частью электродов преобразователя и средой, уровень которой измеряется, а второй — остальной частью электродов преобразователя и воздухом. При повышении уровня, например, происходит замещение воздуха в пространстве между электродами и измеряемой средой, обладающей существенно отличной диэлектрической проницаемостью. В результате этого меняется емкость преобразователя между электродами.

В СВВ широко распространены **сигнализаторы уровня** (электроконтактные и емкостные устройства для сигнализации уровня среды). Принцип действия электроконтактных сигнализаторов уровня основан на замыкании электрической цепи между электродами датчика или электродом и стенкой емкости при их соприкосновении с поверхностью электропроводящей среды. Электроды необходимой длины устанавливают вертикально или горизонтально на емкостях, в которых необходимо контролировать уровень среды.

2.4. Измерение температуры

Температура — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы и являющаяся одним из основных параметров в инженерных системах. Она характеризуется рядом принципиальных особенностей, обусловивших необходимость применения разнообразных методов и технических средств для ее измерения.

Для измерения температуры были предложены различные температурные шкалы, но наибольшее распространение получила стоградусная температурная шкала Цельсия. По этой шкале за основные (реперные) точки, ограничивающие основной температурный интервал, были приняты точка плавления льда (О°С) и точка кипения воды (100 °С) при нормальном атмосферном давлении. Единица температуры, равная одной сотой части основного температурного интервала, получила название градус (от лат. *gradus* — шаг, ступень). 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 — Т и шкалу Реомюра в градусах Реомюра — ^{0}R: 1С =1,8 ^{0}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 в. Кельвином. В этой шкале нижней

границей основного температурного интервала служит точка абсолютного нуля (О°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 и газообразной (пар воды).

Единицей термодинамической температуры является **кельвин** (К) вместо прежнего наименования — градус Кельвина (°К). Кельвин равен 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 международная практическая температурная шкала (МПТШ).

Согласно МПТШ и ГОСТ 8.157—75 предусматривается применение двух температурных шкал: термодинамической и практической. Температура по этим шкалам выражаться 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

$$t=T-T_0, \qquad (2.13)$$

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» — 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. Если отсутствует возможность такого контакта, применяют различные бесконтактные методы измерения.

Средство для контактного измерения температуры называется **термометром.** По принципу действия термометры разделены на три группы — **термометры 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. Предел измерения этими термометрами составляет от -190 до +600 °С.

Жидкостный стеклянный технический термометр (рис. 2.11, 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 применяют 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 град, (типа У и Б). Нижняя часть Б выполняется различной длины (от 66 до 2000 мм).

Для предохранения стеклянной оболочки от повреждения термометры помещают в защитные стальные оправы, которые, как и термометры, по форме выполняют прямыми и угловыми. Для сигнализации и измерения температуры применяют термометры ртутные электроконтактные. Их изготавливают с электроконтактами, впаянными в капиллярную трубку термометра. Замыкание или размыкание электрической цепи происходит вследствие расширения или сжатия ртути при нагревании или охлаждении нижней части термометра.

Принцип действия **манометрических термометров** основан на изменении давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме (рис. 21, б), которая состоит 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 через тягу *10,* зубчатый сектор *11* и шестерню *12* связан с показывающей стрелкой прибора *13.*

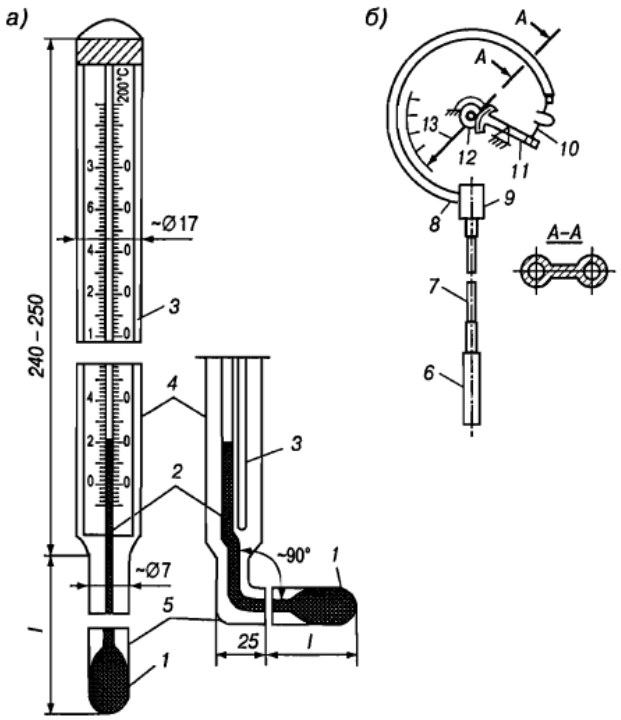


Рис. 2.11. Термометры расширения: а — технический жидкостный стеклянный; б — показывающий манометрический

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, 77, 12* преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора, по которой производят отсчет температуры.

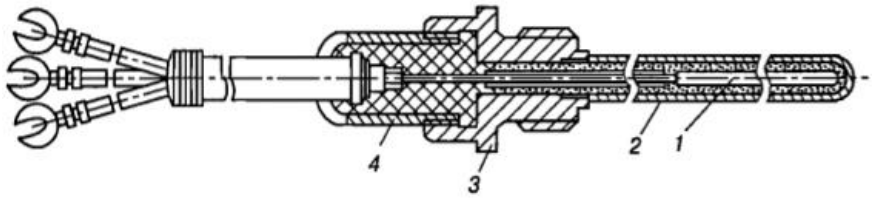


Рис. 2.12. Конструкция термометра сопротивления

Принцип действия **термометра сопротивления** (рис. 2.12) основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от температуры. Чувствительным элементом 7 термометра сопротивления является тонкая платиновая или медная проволока, 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. 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.

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 употребляются в связи с широким распространением автоматических электронных мостов.

Принципиальная схема уравновешенного моста с включенным термометром сопротивления *Rt* изображена на рис. 2.13 (R_1 и R_3 — резисторы с постоянными известными

сопротивлениями, R_2 — реохорд, который является регулируемым плечом моста). Сопротивление двух соединительных линий $2R_Л$ прибавляется к сопротивлению термометра *Rt.* К одной из диагоналей моста *(BD)* подключен внешний источник постоянного тока, к измерительной диагонали *AC* — чувствительный измерительный прибор (нуль-прибор НП). Для равновесия моста необходимо, чтобы произведения параллельных плеч моста были равны, т.е. $R_1(Rt + 2R_л) = R_2 R_3$, отсюда $Rt = (R_3/R_1)/R_2 - 2R_Л$. Изменяя сопротивление 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.

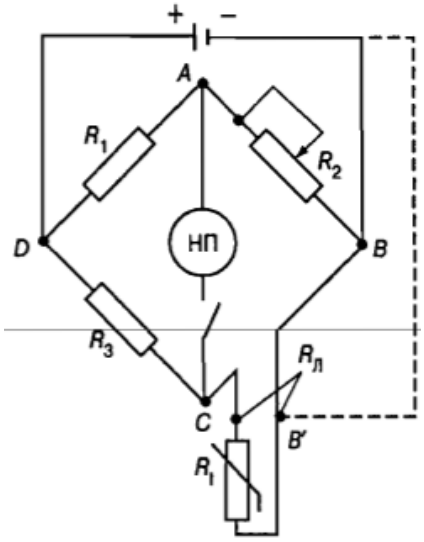


Рис. 2.13. Принципиальная схема уравновешенного моста с термометром сопротивления

При изменении сопротивления термометра R_1, 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.

Описанный выше способ измерения температуры применяют в лабораторных условиях. В промышленных условиях для этих целей используют автоматические электронные мосты типа КСМ-4 и др. (рис. 2.14), в измерительную диагональ которых вместо нуль-прибора включается электронный фазочувствительный усилитель *ЭУ,* а движок реохорда и каретка с указателем и пером перемещаются реверсивным электродвигателем *РД,* подключенным к выходу этого усилителя. Если температура среды не меняется, то сопротивление термометра *R,* также не изменяется и мостовая измерительная схема находится в равновесии, т. е. разность потенциалов между точками *А* и *С* равны нулю, сигнал на *ЭУ* не поступает, движок реохорда R_p неподвижен, стрелка показывает измеряемое значение температуры.

При изменении температуры изменяется сопротивление термометра R_t. Равновесие мостовой схемы нарушается, и в диагонали моста между точками *А* и С появляется напряжение небаланса, амплитуда и фаза которого зависят от величины и направления отклонения температуры от прежнего значения точек. Это напряжение усиливается усилителем *ЭУ* до значения, недостаточного для приведения в действие реверсивного двигателя *РД.* Выходной вал РД кинетически связан с движком реохорда и кареткой, передвигает их до тех пор, пока напряжение небаланса, уменьшаясь, не станет равным нулю. При

достижении измерительным мостом состояния равновесия ротор *РД* останавливается, а движок реохорда и каретка с указателем и пером занимают положение, соответствующее новому значению сопротивления термометра, т.е. новому значению измеряемой температуры.

Термоэлектрические термометры (термопары) применяют для измерения очень высоких температур, и поэтому в схемах автоматизации СВВ они практически не используются.

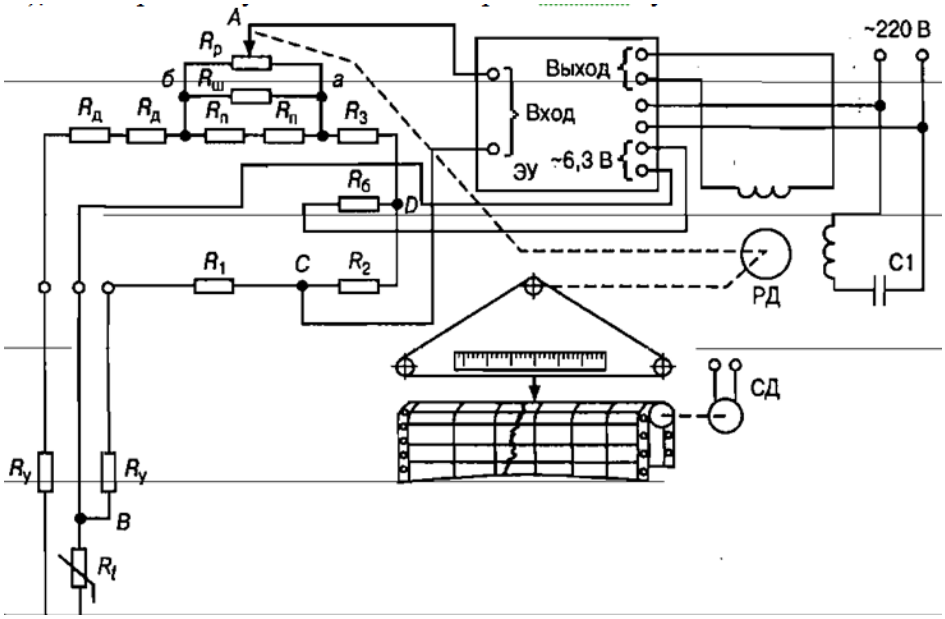


Рис. 2.14. Принципиальная схема автоматического электронного уравновешенного моста типа КСМ-4

2.5. Измерение качественных параметров питьевых и сточных вод

Эффективное управления современными СВВ невозможно без оперативного контроля качественных параметров природных и сточных вод на всех переделах их обработки, подача потребителям и сброса в водоемы.

В системах водоснабжения такими параметрами являются мутность, прозрачность, цветность воды, ее солесодержание, pH, количество остаточного хлора. В системах водоотведения — это pH, содержание растворенного кислорода, влажность осадков и др. Для автоматического контроля этих параметров используются приборы как общепромышленного, так и специального назначения.

Для определения этих параметров различают прямой и косвенный методы.

Прямой метод основан на непосредственном выделении количества *X* определяемого компонента (например, химическим путем) и нахождении его содержания в общей пробе вещества *A* в виде отношения $C_x = X/A$. Однако прямые методы измерения мало пригодны для построения автоматических измерительных приборов. В практике автоматизации контроля чаще всего используют **косвенные методы** измерения, основанные на существовании строго определенных зависимостей между составом анализируемого вещества и его физико-химическими свойствами, которые могут быть непрерывно и автоматически измерены. Соответственно, существуют различные способы определения состава вещества: электрохимические, кондуктометрические, термохимические, термомагнитные, спектральные, фотоколориметрические, хроматографические, масспектрометрические, рентгеновские и др. Измерительные устройства для анализа состава и свойств жидких сред называют анализаторами жидкости.

Массовой концентрацией компонента называется отношение массы компонента, содержащейся в веществе, к общему объему вещества. В Международной системе единиц

СИ за единицу массовой концентрации принято число килограммов компонента, содержащегося в 1 $м^3$ жидкой фазы, — $кг/м^3$. На практике измерение концентрации осуществляют в граммах на литр (г/л) и миллиграммах на литр (мг/л). Соотношение между этими единицами следующее: 1 $кг/м^3$ = 1 г/л = 10^{-3} мг/л.

В СВВ чаще других применяют автоматические электрохимические, иономерные и кондуктометрические анализаторы жидкости.

Принцип действия **иономерных анализаторов жидкости** основан на измерении электродвижущей силы электродной системы, селективно (выборочно) зависящей от активности определенного иона. Активность водородных ионов H^+ характеризуется величиной pH (по-русски произносится «пэ-аш»). Символом pH обозначается взятый с обратным знаком десятичный логарифм концентрации водородных ионов водных растворов кислот, солей и щелочей: $pH = -lg [H^+]$. Для нейтральной среды pH = 7; при pH < 7 среда будет кислой, а при pH > 7 — щелочной. Приборы, измеряющие величину pH, называются **pH-метрами.**

Измерение величины pH производится с помощью электродной системы, погружаемой в контролируемую жидкость. При погружении одного электрода в раствор между электродом и раствором образуется разность потенциалов, возникновение которой объясняется тем, что при низких концентрациях раствора металл.

Электрода частично растворяется, т.е. в раствор переходят положительно заряженные ионы металла и раствор заряжается положительно. На электроде при этом остаются избыточные электроны, и он заряжается отрицательно относительно раствора. При высоких концент-рациях раствора положительные ионы выделяются на электроде, заряжая его положительно по отношению к раствору.

Размер такого электродного потенциала зависит от материала электрода, температуры раствора и концентрации в нем активных ионов, способных обмениваться с ионами электрода. Поскольку определить значение этого потенциала непосредственно не представляется возможным, в раствор опускают еще один электрод, который вносит в цепь свой электродный потенциал. Таким образом, измеряется лишь разность потенциалов различных пар электродов.

Измерительный преобразователь иономерного анализатора жидкости состоит из двух электродов — измерительного, потенциал которого относительно раствора зависит от концентрации контролируемых ионов в растворе, и вспомогательного, который практически не изменяет свой потенциал относительно раствора при изменении концентрации ионов в нем. Вспомогательный электрод для повышения точности измерений обычно погружают во вспомогательный раствор стабильного состава.

Эталонным измерительным электродом для определения pH является водородный электрод, представляющий собой покрытую платиновой чернью платиновую пластинку, которая омывается газообразным водородом. Так как пользоваться электродом из платины в производственных условиях неудобно, то в качестве измерительных электродов в серийных анализаторах для контроля величин pH используют стеклянный электрод (рис. 25, а), который представляет собой толстостенную стеклянную трубку *2* с приваренным на конце тонкостенным полым шариком *1* из литиевого стекла. Трубка и шарик заполнены раствором бромистоводородной кислоты. В этот раствор помещен контактный электрод *3,* представляющий собой серебряную проволоку, покрытую слоем бромистого серебра. При погружении такого электрода в контролируемый раствор между поверхностью шарика электрода и раствором происходит обмен ионами, в результате которого ионы лития в поверхностных слоях стекла замещаются ионами водорода и стеклянный электрод приобретает свойства водородного электрода.

Вспомогательный электрод выполнен в пластмассовом корпусе 5, в котором находится серебряный контакт *4.* Полость вокруг контакта заполнена кристаллическим хлористым серебром. Хлорсеребряный электрод ввернут в сосуд *6* с раствором хлористого калия КС1, который по трубке 7, заканчивающейся микропористой перегородкой *8,*

непрерывно просачивается в контролируемую среду. Через хлористый калий осуществляется беспотенциальный контакт вспомогательного электрода с контролируемой средой. Кроме того, раствор КС1 защищает вспомогательный электрод от воздействия высоких температур при измерении pH горячих растворов и предотвращает диффузию посторонних ионов из контролируемой среды. Таким образом, в такой электродной системе из всех слагаемых выходной разности потенциалов от концентрации активных ионов водорода в растворе зависит только разность потенциалов, возникающая на границе шарика стеклянного электрода с контролируемой средой. Измерение разности потенциалов электродной системы производят измерительным прибором, входящим в комплект анализатора.

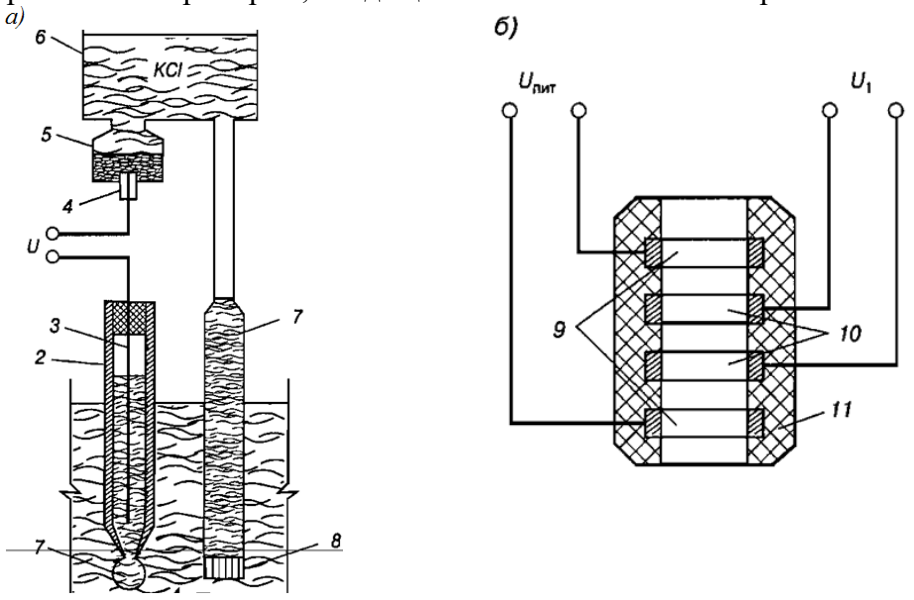


Рис. 2.15. Измерительные преобразователи анализаторов жидкости: а — иономерный; б — кондуктометрический

Принцип действия **коццукгометрических анализаторов** основан на изменении электропроводности жидкости от концентрации и природы содержащихся в растворе веществ, причем концентрация растворенного вещества должна быть достаточно высокой. Анализаторы этого типа выпускают с электродными и безэлектродными преобразователями, проточными и погружными.

Работу кондуктометрических анализаторов рассмотрим на примере четырехэлектродного преобразователя (рис. 2.15, *б).* В нем имеются две пары электродов *9 и 10,* установленных в корпусе *11* из электроизоляционного материала. При подводе к крайним электродам *9* напряжения питания £/$_{пит}$ переменного тока через контролируемый раствор потечет ток. При постоянной силе этого тока напряжение U_b снимаемое со средних электродов, прямо пропорционально электрическому сопротивлению измеряемой среды, зависящему от концентрации растворенного вещества и температуры раствора. Погружные датчики целиком погружаются в измеряемую среду.

Для измерения мутности очищаемой питьевой воды широко применяется **автоматический анализатор** типа АМС-У, работа которого основана на компенсационном принципе измерения. На этом же принципе работает мутномер АОВ-9 (рис. 2.16, *а),* в котором световой поток от лампы с помощью двух оптических систем, состоящих из линз и призм, направляется по двум каналам соответственно в измерительную кювету, через которую пропускается контролируемая вода, и сравнительную кювету, заполненную эталонной суспензией.

Рассеянный в кюветах свет с помощью зеркал направляется на фотоэлемент. Световой коммутатор производит переключение световых потоков через измерительную и сравнительную кюветы. При равенстве световых потоков, поступающих на фотоэлемент по

обоим световым каналам, в цепи фотоэлемента течет постоянный ток. При разнице в величине сравниваемых потоков в цепи фотоэлемента появляется пульсирующий ток. Образующееся на нагрузочном сопротивлении напряжение, пропорциональное переменной составляющей фотоэлемента, подается на вход автоматическою моста. Вал реверсивного двигателя моста механически связан с диафрагмой, с помощью которой изменяется величина светового потока, проходящего через измерительную кювету. По положению вала двигателя и связанной с ним указательной стрелки и шкале измерительного прибора судят о величине мутности воды.

В **упрощенном мутномере** (рис. 2.16, *б)* используются некомпенсационная схема измерения и один оптический канал.

Световой поток от лампы, питаемой стабилизированным напряжением, на¬правляется оптической системой в кювету. Часть рассеянного в кювете светового потока попадает на фотоэлемент. Фототок усиливается усилителем и направляется в измерительный прибор.

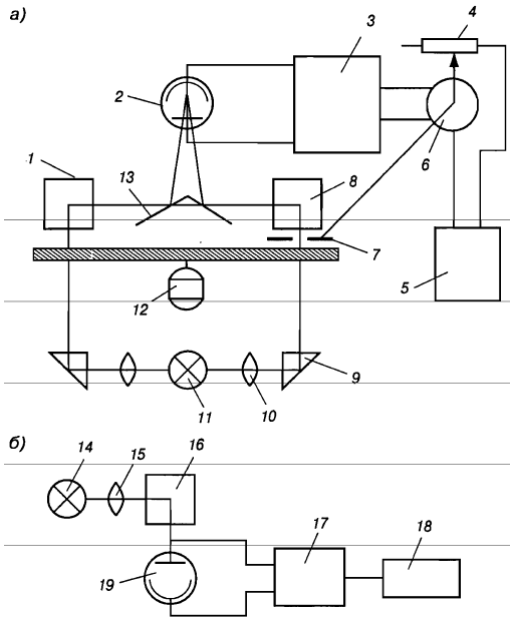


Рис. 2.16. Схемы приборов для определения мутности воды: а - компенсационный мутномер; б - упрощенный мутномер; 1, 8, 16 - измерительная и сравнительная кюветы; 2, 19 - фотоэлемент; 3, 17 - усилитель; 4 - реохорд; 5, 18 - вторичный прибор; 6 - реверсивный двигатель; 7 - диафрагма; 9 - призмы; 10 - линзы; 12 - световой коммутатор; 13 - зеркала; 14 - лампа; 15 - линза

Важное значение для управления обеззараживанием питьевых и сточных вод имеет контроль за концентрацией хлора. Автоматический анализатор хлора АПК-01М (рис. 2.17) содержит электро-химический преобразователь 2, оборудованный блоком дозирования реагентов *3* и блоком пробоподготовки 7, соединенными через преобразователь *2* с нормирующим узлом *23* и балансовым преобразователем *28,* узлом термокоррекции *24* и блоком согласования *25,* снабженным источником питания *26,* и с регистрирующим прибором *30.* Преобразователь *28* образован мостовой схемой *29* и нуль-органом *27.*

Преобразователь *2* снабжен клапаном *8,* седло *9* которого разделяет камеры перелива 7 и смешивания 77. Камера 7 гидравлически связана со сливной камерой *12,* оборудованной инжектором *14* с горловиной *13,* чувствительным элементом *17* и обводной трубкой *18.* В камере *11* установлен штуцер подачи реагентов, а в камере *12* — штуцер слива *10.* Элемент *17* образован катодом *19* и анодом *16.* Блок дозирования *3* снабжен емкостями для реагентов *6,* микродозаторами *5* и смесителем *4.* Блок пробоподготовки *1* имеет входной регулятор давления *34* с манометром *33,* фильтром с манометром *32,* регулятором *20,* сливным бочком

22 и редуктором *21*, образованным последовательно включенными выходными регуляторами давления *31*.

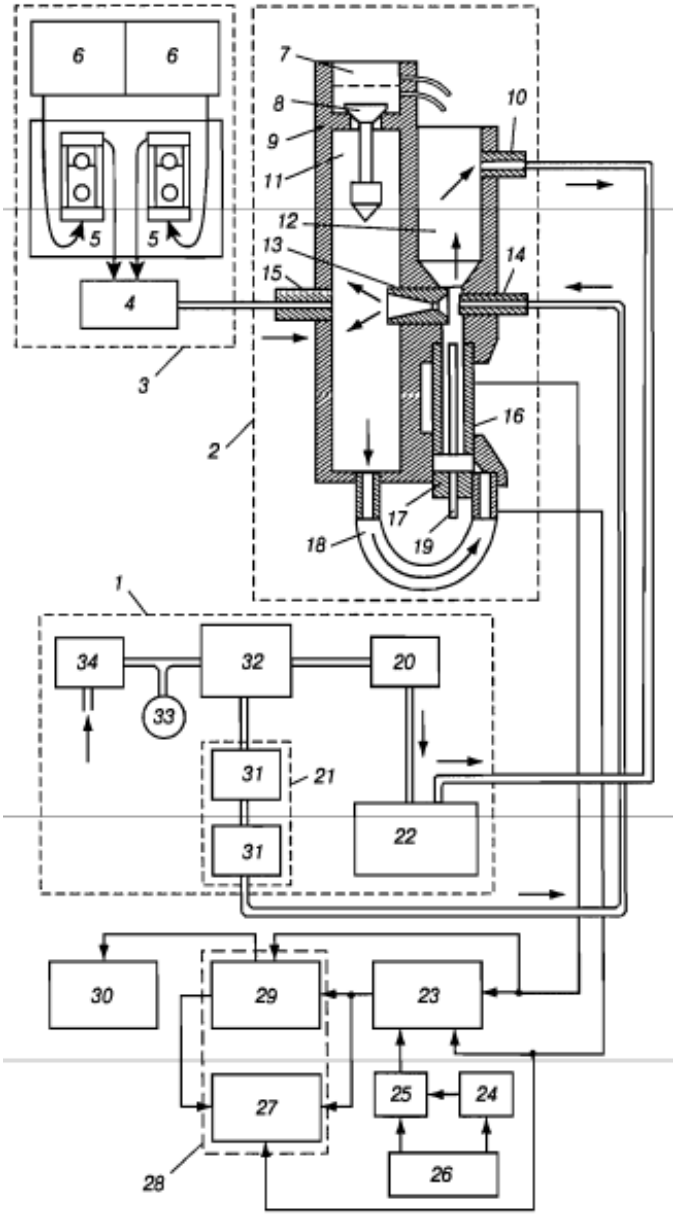


Рис. 2.17. Структурная схема анализатора хлора АПК-ОIМ

Анализируемая вода подается насосом из очистного сооружения через входной регулятор давления *34*, при этом по манометру *33* устанавливается требуемое давление подаваемой воды. В фильтре *32* удаляются взвешенные вещества и нерастворимые примеси с периодической сменой фильтрующего патрона. Редуктором *21* стабилизируется давление воды после прохождения фильтра *32*, которая далее через инжектор 74 поступает в камеру *11*. Одновременно с водой в камеру *11* поступают реагенты из смесителя *4* блока *3*. Отсюда большая часть воды проходит через трубку *18* к чувствительному элементу 77, а меньшая часть — через клапан 8 в камеры 7 и *12*. Из камеры *12* вода поступает в бачок *32*, который связан с регулятором *20*, обеспечивающим стабильность гидродинамического режима в устройстве и отбор проб для химического анализа.

В чувствительном элементе 77 в результате электрохимических реакций возникает выходной сигнал, пропорциональный содержанию хлора в воде. Выходной сигнал узлом *23* приводится к нормированному значению, корректируется с учетом температуры воды узлом

24 и преобразуется блоком *25,* мостовой схемой *29* и нуль-органом 27 для подачи к регистрирующему прибору.

Другим прибором для определения концентрации хлора на основе полярографического метода измерения является автоматический анализатор КОХ-1, принцип действия которого заключатся в измерении силы тока на поляризованном ртутном электроде. Ток однозначно связан с концентрацией хлора в анализируемой воде. В соответствии со схемой прибора (рис. 28) вода из крана через дозирующий сосуд (стабилизатор расхода) поступает с постоянной скоростью в электродную ячейку, состоящую из трех электродов: ртутного положительного, отрицательного, выполненного из нержавеющей стали, и вспомогательного каломельного, расположенного в непосредственной близости от ртутного электрода. Вспомогательный электрод служит для поддержания Постоянства потенциала измерительного электрода. Для этих же Целей в системе прибора применяется электродное устройство — потенциостат. Так как в данном приборе напряжение подается на электроды (что приводит к разложению аминов), он может измерять концентрацию всего хлора, присутствующего в воде, с учетом связанного хлора без введения реагента.

В системах очистки сточных вод одним из важнейших измерений является определение концентрации растворенного кислорода (КРК). Для этой цели разработаны два варианта кислородомеров — К-115 и К-125, которые заменили выпускавшиеся ранее приборы ЗГ-152-ООЗ и АКВА-Л. Кислородомер К-115 предназначен для разовых измерений КРК в лабораторных условиях в отобранных пробах воды. Для непрерывного измерения КРК в аэротенках применяется прибор К-125, который состоит из датчика и преобразователя с унифицированным выходом для подключения регистрирующих приборов и регулирующих устройств. В основу этого прибора положен полярографический метод измерения. Поляризационное напряжение создается внешним источником тока.

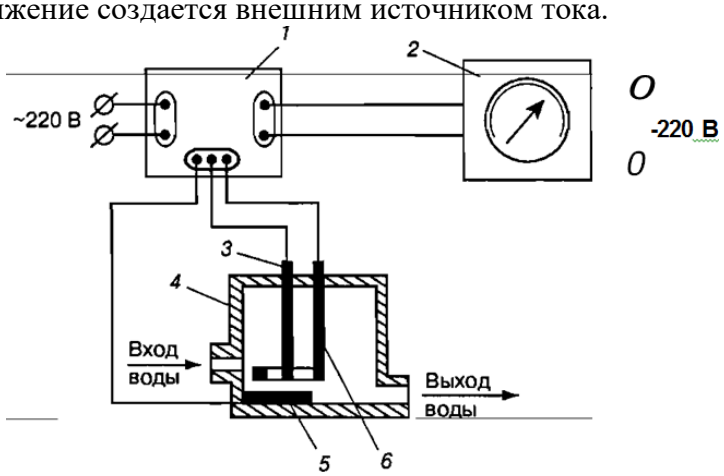


Рис. 2.18. Схема автоматического анализатора хлора КОХ-1: 1 — входной блок; 2 — вторичный прибор; 3 — вспомогательный электрод; 4— корпус электродной ячейки; 5, 6— положительный ртутный и отрицательный кольцевой электроды

Датчик полярографического анализатора КРК (рис. 2.19) выполнен в виде электродной пары, состоящей из катода 7 из литой пластины сферической формы и анода 8 в виде полого свинцового цилиндра, погруженной в жидкий электролит 7 и закрытой полимерной мембраной 10. Катод 7 навинчивается на корпус из оргстекла 3, где с помощью гайки 2 также крепится мембрана 10, а анод 8 крепится на цилиндрическом стержне 9.

Датчик устанавливается в сосуде с помощью шлифа 5 или непосредственно погружается в воду на специальной конструкции. Он подключается к электронному усилителю кабелем 4, токоотводящие провода к которому от катода 7 и анода 8 подводятся по каналам 6.

Вначале происходит диффузия кислорода из воды через мембрану 10 к катоду 7, где он восстанавливается в результате электрохимической реакции с образованием гидроксида

свинца. На выходе датчика генерируется токовый сигнал, линейно зависящий от содержания кислорода в воде. Анод 8 служит для обеспечения потенциала катода, необходимого для электровосстановления кислорода, а электролит 7 — для обеспечения связи между анодом и катодом.

Кислородомеры позволяют также реализовать электрохимический метод определения биохимической потребности в кислороде (ВПК) сточных и природных вод. На базе показанного на рис. 29 датчика созданы электрохимические определители ВПК, один из которых (ЭХО-1) применяется для разовых анализов, другой (ЭХО-2) — для непрерывного автоматического контроля.

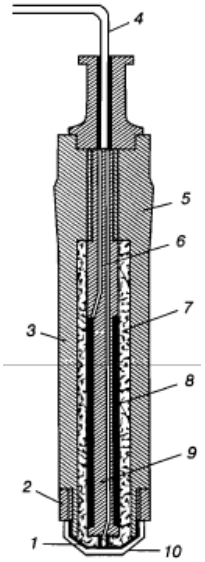


Рис. 2.19. Датчик для измерения концентрации растворенного кислорода

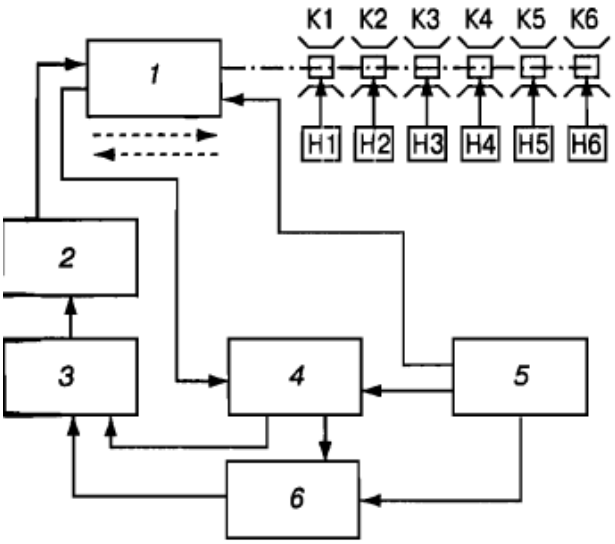


Рис. 2.20. Структурная схема автоматического нефелометра ЛАН-1

При очистке сточных вод качество работы аэротенков и вторичных отстойников характеризует концентрация активного ила. Этот важный параметр измеряется с помощью автоматического Нефелометра ЛАН-1 (рис. 2.20), который может одновременно контролировать работу до шести очистных сооружений. Прибор состоит: из механизма перемещения 2, служащего для передвижения датчика оптической плотности *1* от одной кюветы к другой и для прокачивания насосами Н1-Н6 жидкости через кюветы К1— Кб; регистрирующего многоточечного потенциометра *6* типа КСП, предназначенного для записи показаний на диаграммной ленте и для синхронизации работы перемещения датчика оптической плотности; электронной стойки с измерителем оптической плотности *4* и источником питания 5, преобразующей электрические сигналы, поступающие от датчика *1,* и обеспечивающей управление механизмом перемещения 2 посредством синхронизирующего устройства *3.*

РАЗДЕЛ 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ. ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОСНОВЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Главной целью при изучении данного раздела является получение общетеоретических сведений о системах водоснабжения городов и населенных пунктов, их классификации, определения расчетных расходов.

Целью изучения раздела является изучение элементов комплекса системы водоснабжения, обретения навыков по определению суточных и часовых расходов воды, определению свободных напоров, проведению гидравлических расчетов.

Темы раздела:

Основные свойства объектов регулирования
Оценки качества автоматического регулирования
Основные законы автоматического регулирования и типы регуляторов
Настройка автоматических регуляторов
Классификация систем автоматического регулирования
Микропроцессорные регуляторы
Регулирующие органы и исполнительные механизмы
Схемы автоматического регулирования типовых технологических параметров

3.1. Основные свойства объектов регулирования

Объект регулирования является элементом автоматической системы регулирования (АСР), и свойства всей системы во многом определяются свойствами объекта. Изучение свойств объектов регулирования — важный и часто основной этап разработки АСР. Объект регулирования в отличие от остальных элементов АСР является заранее заданным элементом, свойства которого определяются его значением в технологическом процессе. Поэтому создание АСР сводится к подбору остальных элементов с такими свойствами, чтобы свойства всей системы обеспечивали требуемую точность стабилизации регулируемого параметра, что невозможно сделать без знания свойств объекта.

Теория регулирования рассматривает объект как устройство, преобразующее по определенному закону свои входные сигналы в выходные. Состояние объекта в каждый момент времени определяется его выходными сигналами (регулируемыми параметрами), зависимость которых от входных (т.е. характер преобразования сигналов) и обусловливает свойства объекта. Другие свойства, характеризующие их физическую природу, конструкцию, условия эксплуатации, находящуюся в них среду и т.п., как указывалось, несущественны для процессов регулирования. Поэтому часто самым различным по своей природе объектам присущи одинаковые зависимости выходных сигналов от входных.

Как было показано ранее, при управлении СВВ их разбивают на элементарные объекты регулирования — как правило, с одним регулируемым и одним регулирующим параметром. Управление такими объектами осуществляется одноконтурными АСР. Поэтому здесь будут рассматриваться свойства только объектов регулирования с одним выходным сигналом.

Принято различать статические и динамические свойства объектов регулирования. Статические свойства объекта — это его свойства в установившемся состоянии (в статике), т.е. при неизменяющихся входном и выходном сигналах. Зависимость установившегося значения выходного сигнала от входного называется статической характеристикой объекта.

В качестве примера рассмотрим статическую характеристику (емкости 7 с притоком и потреблением жидкости, выходным сиг- 1алом которой является уровень (рис. 3.1, *а).* На

линии потребления установлен клапан *2* с постоянным проходным сечением, после клапана происходит свободный слив жидкости. В этом случае расход на потреблении о уже не является входным сигналом объекта, так как он не может изменяться произвольно, а зависит от уровня в емкости *x,* т.е. от выходного сигнала. Из гидравлики известно, что эта зависимость имеет вид

$$\upsilon = к\sqrt{x} \tag{3.1}$$

где *к* — коэффициент, зависящий от пропускной способности клапана.

Таким образом, в данном примере объект имеет один входной сигнал — расход на притоке *и,* и один выходной — уровень в емкости *х* (рис. 3.1, *б).* В состоянии равновесия объекта приток и Употребление должны быть одинаковы и постоянны. Следовательно, заменяя в формуле (3.1) о на *и* и решая это уравнение относительно *х,* получим зависимость установившегося значения уровня *х* от постоянного расхода на притоке *и,* т. е. статическую характеристику объекта:

$$x = u^2/k^2 \tag{3.2}$$

Эта статическая характеристика приведена на рис. 3.1, в.

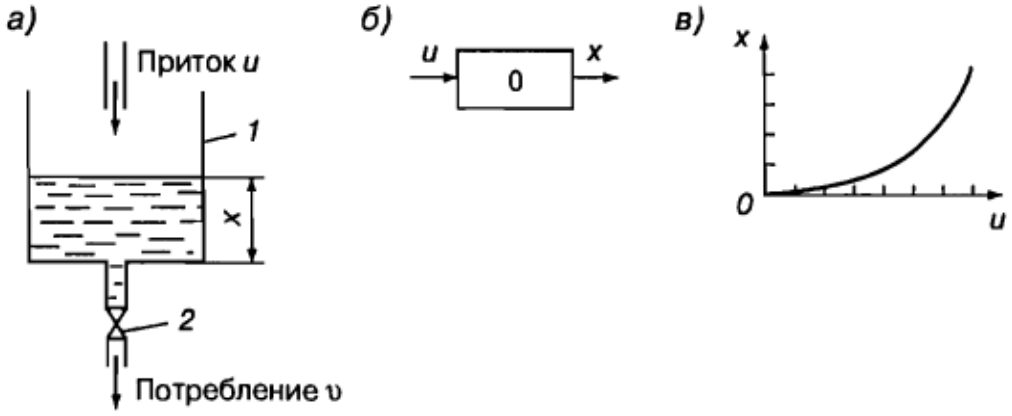


Рис. 3.1. Емкость как объект регулирования: а - схема; б - структурная схема; в - статическая характеристика; 1 - емкость; 2 - клапан

Как отмечалось, в реальных условиях любой объект регулирования подвержен воздействию случайных возмущений и поэтому всегда находится в неустановившемся состоянии. Следовательно, статическая характеристика объекта регулирования не может полностью характеризовать его поведение в реальных условиях. С помощью этой характеристики можно определить лишь статическую ошибку АСР. Поведение же объекта в неустановившемся состоянии (в динамике) зависит от его динамических свойств.

Динамические свойства объекта проявляются только при изменении его входных сигналов. При этом и выходной сигнал будет изменяться во времени. Причем в зависимости от характера изменения входных сигналов выходной сигнал одного и того же объекта может изменяться по-разному. Поэтому для характеристики динамических свойств объекта нельзя построить зависимость выходного параметра от входного, аналогичную статической характеристике. Для выявления динамических свойств объекта необходимо узнать его реакцию на какой-либо определенный вид входного воздействия. Чтобы можно было сравнивать динамические свойства различных объектов, применяют одинаковые стандартизованные входные воздействия. Наиболее распространены следующие два вида стандартных воздействий:

- скачкообразные, когда входной сигнал изменяют мгновенно, скачком на определенную величину, а затем поддерживают постоянным (рис. 3.2, *а);*
- импульсные, когда входной сигнал изменяют на очень большую величину в течение очень короткого промежутка времени, а затем возвращают к прежнему значению; такая форма воздействия имеет вид импульса (рис. 3.2, *б).*

До подачи стандартного воздействия объект должен находиться в состоянии равновесия, т.е. его входной и выходной сигналы должны быть постоянными во времени. Зависимость выходного сигнала объекта во времени начиная с момента подачи стандартного воздействия называется динамической характеристикой или переходным процессом.

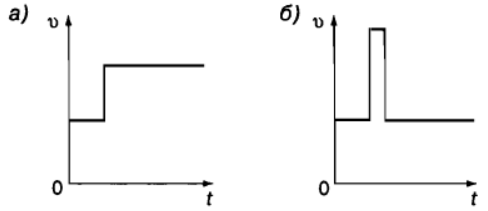


Рис. 3.2. Графики стандартных возмущений: а - скачкообразное воздействие; б - импульсное воздействие

Графики типичных переходных процессов *x(t)* в промышленных объектах регулирования при скачкообразном входном воздействии приведены на рис. 3.3, где через *x* обозначен выходной сигнал, а через *t* — время.

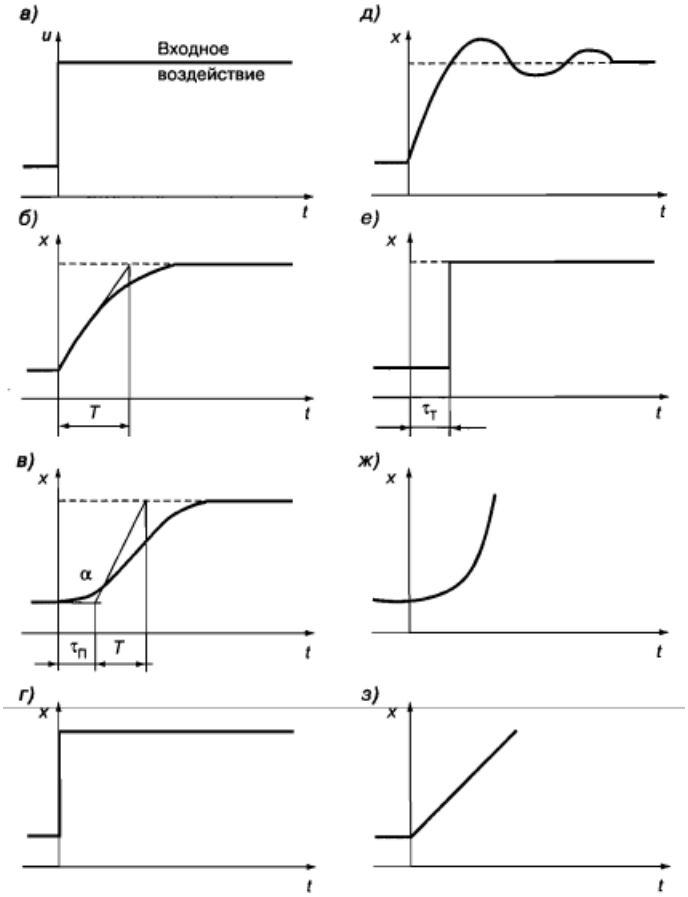


Рис. 3.3. Типичные переходные процессы в объектах регулирования при скачкообразном входном воздействии: а - изменение входного сигнала; б-з - изменения выходного сигнала;
б, в - инерционных; г - безынерционного; д - колебательного; е - объекта с запаздыванием; ж - неустойчивого; з – нейтрального

Рассмотрим для примера переходный процесс в емкости с притоком и потреблением жидкости (см. рис. 3.1). До подачи стандартного воздействия по расходу на притоке объект находится в состоянии равновесия: приток и потребление одинаковы. Увеличим расход на притоке *u* скачком (рис. 3.3, *а*). Тогда в емкости начнется накопление жидкости и уровень *x* в ней будет возрастать. Скорость роста уровня, очевидно, зависит от разности расходов на притоке и потреблении $\upsilon - u$, и она тем больше, чем больше эта разность. С другой стороны,

с ростом уровня в емкости сразу же начнется и увеличение расхода v через клапан в соответствии с формулой (4.1). Следовательно, разность расходов на притоке и потреблении будет уменьшаться, а рост уровня — замедляться. Увеличение уровня прекратится, когда потребление снова сравняется с притоком и тем самым будет достигнуто новое состояние равновесия. Описанный переходный процесс *x(t)* показан на рис. 3.3, *б.*

Если объект регулирования имеет несколько входных сигналов (регулирующий и возмущающие параметры), то переходные процессы в нем при подаче стандартного воздействия по каждому входному сигналу могут быть неодинаковыми. В этом случае различают воздействия, поданные по каналу регулирования (изменяется регулирующий параметр) или по каналу возмущения (изменяется возмущающий параметр). Наиболее интересен переходный процесс в объекте по каналу регулирования, так как именно через этот канал осуществляется прямая связь в АСР.

При изучении переходных процессов необходимо принимать во внимание, что всегда существуют реальные возмущающие воздействия, вызывающие случайные колебания выходного сигнала объекта. Чтобы четко выявить переходный процесс на фоне случайных колебаний, стандартные воздействия должны быть значительно более сильными, чем случайные воздействия на объект. Именно по этой причине стандартные воздействия имеют вид скачка или импульса, т.е. мгновенно и наиболее резко изменяются входные сигналы. Величину скачкообразного или импульсного воздействия выбирают такой, чтобы, с одной стороны, получить заметный переходный процесс, а с другой — не допустить возникновения аварийного режима работы. Переходные процессы являются универсальным средством изучения динамических свойств объектов. Чтобы понять, как в переходном процессе проявляются динамические свойства объекта и как их можно устауовить по виду процесса, рассмотрим типичные динамическиесвойства объектов и соответствующие им переходные процессы.

Почти все объекты регулирования обладают **инерцией,** которая проявляется в том, что при мгновенном изменении входного сигнала выходной сигнал изменяется не мгновенно, а постепенно.

Изменение выходного сигнала продолжается и после прекращения Вводного воздействия, т.е. когда входной сигнал уже не изменяется.

Такое явление называется **последействием.**

Примеры переходных процессов для инерционных объектов показаны на рис. 3.3, *б, в*.

Инерция присуща объектам и протекающим в них процессам самой различной природы. Например, постепенное изменение уровня в емкости после скачкообразного или импульсного изменения притока жидкости — проявление гидродинамической инерции.

У некоторых объектов инерция может быть пренебрежимо смолой в сравнении с остальными элементами АСР и не оказывает заметного влияния на процесс регулирования. Такие объекты называют **безынерционными.** В идеальном безынерционном объекте выходной сигнал изменяется синхронно с входным без всякого последействия, как показано на рис. 3.3, г. Инерция реальных объектов регулирования вызвана наличием в них запаса вещества **или** энергии. Чем больше этот запас, тем сильнее проявляется инерция объекта. Так, инерция емкости обусловлена запасом жидкости в ней. Способность объекта накапливать вещество или энергию называется **емкостью** и является количественной мерой ^ инерции. При переходных процессах в инерционных объектах запас вещества или энергии в них может изменяться как монотонно (только увеличиваться или только уменьшаться), так и колебательно. Например, груз, подвешенный на пружине, при отклонении его от положения равновесия начинает колебаться. Такой же колебательный характер имеет величина тока в электрическом колебательном контуре.

Общим для этих примеров является колебательный характер выходных сигналов объектов — положения груза и тока в электрическом контуре. Объекты, обладающие таким свойством, называются **колебательными.** В отличие от них объекты с монотонным изменением выходных сигналов называются **апериодическими**: (неколебательными).

Примеры переходных процессов в апериодических объектах регулирования приведены на рис. 3.3, *б, в,* в колебательном объекте — на рис. 3.3, *д*.

Еще одним важным свойством реальных объектов является запаздывание. Оно проявляется в том, что реакция объекта на входное воздействие, т.е. изменение его выходного сигнала, запаздывает по отношению к изменению входного сигнала. Переходный процесс с запаздыванием показан на рис. 3.3, *е.*

Мы рассматривали объекты регулирования, в которых переходные процессы заканчиваются установившимся значением выходного сигнала (пунктирная линия на рис. 3.3, *б— е).* Такие объекты под влиянием входного воздействия переходят из одного состояния равновесия в другое (отсюда и название процесса — переходный). Эти объекты регулирования получили название **устойчивых.** Все рассмотренные выше переходные процессы присущи устойчивым объектам.

Устойчивые объекты регулирования обладают одним общим свойством — **самовыравниванием,** т.е. способностью переходить из одного установившегося состояния в другое по окончании переходного процесса при скачкообразном входном воздействии. Чем меньше изменяется выходной сигнал в переходном процессе при одном и том же скачкообразном входном воздействии, тем больше степень самовыравнивания объекта. Существуют устойчивые объекты с очень большим самовыравниванием, когда выходной сигнал после переходного процесса почти не отличается от его начального значения. График статической характеристики таких объектов расположен почти горизонтально, т. е. в установившемся состоянии выходной сигнал очень слабо зависит от входного. В СВВ имеются объекты и с очень малым самовыравниванием, когда малейшее изменение входного сигнала значительно изменяет выходной.

Устойчивость — широко распространенное в СВВ, но не обязательное свойство объектов: существуют и **неустойчивые объекты** регулирования. У таких объектов состояние равновесия существует, но оно неустойчиво, поэтому любое сколь угодно малое воздействие выводит неустойчивый объект из состояния равновесия, и с течением времени он все больше отклоняется от этого состояния. Переходный процесс в неустойчивом объекте показан на рис. 3.3, *ж*.

Неустойчивые объекты довольно редки. Значительно чаще встречаются так называемые **нейтральные объекты,** занимающие промежуточное положение между устойчивыми и неустойчивыми. Например, нейтральный объект можно получить из рассмотренной выше емкости с притоком и потреблением жидкости, если расход на потреблении сделать независимым от уровня в емкости. Для этого достаточно, например, установить на линии потребления насос с постоянной производительностью. У такого объекта существует состояние равновесия: когда приток равен потреблению, уровень не изменяется. Однако в отличие от устойчивого объекта (емкости с клапаном на линии потребления — см. рис. 3.1) равенство притока и потребления может соблюдаться при любом значении уровня. Иначе говоря, в состоянии равновесия объекта его выходной сигнал — уровень — может быть любым независимо от расхода на притоке и потреблении, т.е. статической характеристики у такого объекта нет. Поэтому нейтральные объекты называют еще астатическими.

Приложим теперь скачкообразное воздействие к расходу на притоке, например, увеличим его. Так как потребление не зависит от уровня в емкости, то разность между притоком и потреблением будет оставаться постоянной и, следовательно, уровень в емкости будет возрастать с постоянной скоростью, не стремясь ни к какому установившемуся значению. Такой переходный процесс показан на рис. 3.3, з. Подобные свойства присущи всем нейтральным объектам. О нейтральных объектах можно сказать, что они не имеют самовыравнивания.

Рассмотрим теперь, как динамические свойства объектов проявляются в соответствующих переходных процессах. Наиболее широко распространенное свойство инерции объектов в СВВ, как устойчивых, так нейтральных и неустойчивых, проявляется в

переходном процессе в виде плавного, без скачков изменения выходного сигнала (рис. 3.3, *б, в, д*} *ж, з).* Следствием такого поведения инерционного объекта является последствие, т. е. изменение выходного сигнала при уже не изменяющемся (после скачка) входном сигнале. Количественно инерцию объекта можно было бы охарактеризовать скоростью изменения выходного сигнала. Однако, как видно из рис. 33, эта скорость изменяется с течением времени, причем у одних объектов она максимальна в начальный момент времени (рис. 3.3, *б),* а у других — в некоторой точке а (рис. 33, *в).*

Определение максимальной скорости переходного процесса позволяет ввести понятие постоянной времени, которая и служит оценкой инерции объекта. Постоянной времени *Т* объекта называется время, за которое его выходной сигнал *х* достиг бы установившегося значения в переходном процессе, если бы изменялся все время с максимальной скоростью. Как следует из определения, постоянная времени существует только у устойчивых объектов. Ее величину можно найти по графику переходного процесса. Для этого следует провести касательную к этому графику в точке максимальной скорости. Тогда постоянную времени *Т* находят, как показано на рис. 3.3, *б, в.* Такой способ обычно используется только для апериодических (неколебательных) объектов.

С точки зрения управления инерция объектов имеет как положительную, так и отрицательную сторону. Положительная состоит в том, что благодаря инерционности объект не успевает реагировать на кратковременные возмущения, что облегчает стабилизацию его регулируемого параметра. С другой стороны, неизбежное при этом последействие затрудняет компенсацию возмущений в АСР по отклонению, что снижает качество стабилизации параметров.

Свойство колебательности объектов играет только отрицательную роль в процессе регулирования. Вследствие колебательности выходной сигнал объекта изменяется в течение переходного процесса на большую величину, чем в апериодическом объекте. Это видно из сравнения графиков переходных процессов в апериодическом (рис. 3.3, *б, в)* и колебательном (рис. 3.3, *д*) объектах.

Запаздывание в объектах регулирования проявляется в сдвиге по времени начала переходного процесса относительно входного воздействия. Величина этого временного сдвига называется временем запаздывания, а само запаздывание — чистым или транспортным. При транспортном запаздывании выходной сигнал *х* совсем не изменяется в течение всего времени запаздывания τ_t(см. рис. 3.3, е). Однако эффект, похожий на запаздывание, наблюдается и в некоторых объектах без транспортного запаздывания, когда выходной сигнал *х* в переходном процессе сначала изменяется медленно (см. рис. 3.3, *в).* Такой эффект кажущегося запаздывания называется переходным запаздыванием. Время переходного запаздывания τ_t можно найти по графику переходного процесса, как показано на рис. 3.3, *в.*

Запаздывание, в особенности транспортное, является наиболее неблагоприятным свойством объектов с точки зрения их регулирования. Так, в АСР с обратной связью рассогласование, вызываемое возмущающими воздействиями на объект с запаздыванием, проявляется лишь по истечении времени запаздывания. Поэтому и регулирующее воздействие в таких АСР запаздывает по отношению к возмущающим. Получается, что регулятор в АСР реагирует не на текущее, а на прошлое возмущение, что затрудняет его компенсацию и приводит к ухудшению стабилизации регулируемого параметра. Поэтому объекты, имеющие переходное запаздывание, труднее поддаются регулированию.

Как правило, запаздывание обычно сочетается с инерцией. Наиболее трудные для регулирования безынерционные объекты с транспортным запаздыванием встречаются редко. Установлено, №го для объектов с запаздыванием качество регулирования может 0ыть лучше при меньшем отношении времени полного запаздывания $\tau = \tau_{\text{П}} + \tau_t$к постоянной времени *Т.* Отношение τ */Т* минимально (равно нулю) для всех объектов без запаздывания и максимально (бесконечно велико) — для безынерционных с запаздыванием, когда *Т*= 0.

Устойчивые объекты легче поддаются управлению, чем неустойчивые. Так, в любом устойчивом объекте отклонение регулируемого параметра под действием возмущения имеет

вполне определенную, не бесконечную величину (рис. 3.3, *б—е).* Поэтому при достаточно большом самовыравнивании, когда возмущающие воздействия вызывают малые колебания регулируемого параметра, можно обойтись без системы управления. В нейтральных же объектах, в особенности в неустойчивых, отклонение регулируемого параметра под действием возмущений с течением времени может стать сколь угодно большим. Поэтому управлять такими объектами, безусловно, необходимо. Таким образом, самовыравнивание объекта способствует управлению им и поэтому иногда называется саморегулированием.

Степень самовыравнивания, как отмечалось, характеризует запас устойчивости объекта. Объекты с большим самовыравниванием имеют большой запас устойчивости и легко поддаются управлению. Объекты с нулевым самовыравниванием, т. е. нейтральные, не имеют запаса устойчивости (говорят, что они находятся на границе устойчивости). Неустойчивые же объекты обладают отрицательным самовыравниванием, и им приписывают отрицательный запас устойчивости. Следует иметь в виду, что степень самовыравнивания не полностью характеризует объект с точки зрения регулирования. Имеют значение и другие показатели, в частности отношение τ */T.* Так, для объекта с большим отношением τ */T* качество стабилизации его регулируемого параметра в АСР может быть низким даже при значительном самовыравнивании.

3.2. Оценки качества автоматического регулирования

Свойства объекта регулирования всегда определяются его значением в СВВ, но не всегда благоприятны для управления. Поэтому задачей управления объектом можно считать изменение его свойств для уменьшения чувствительности к возмущающим воздействиям. С этой точки зрения АСР в целом можно рассматривать как объект, выходными сигналами которого являются задания $x_{зад}$ и возмущение ν, а выходным сигналом — регулируемый параметр x (рис. 3.4). Этот объект, очевидно, должен обладать лучшими статическими и динамическими свойствами, чем сам объект регулирования.

Как и для объектов регулирования, для АСР также различают статические и динамические показатели. Основным статическим показателем АСР является статическая ошибка, т.е. рассогласование в установившемся состоянии. Как известно, в астатическом АСР статическая ошибка отсутствует. Поэтому можно утверждать, что астатический регулятор наилучшим образом корректирует статические свойства объекта.

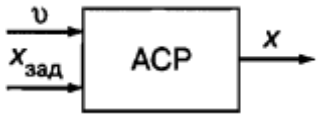


Рис. 3.4. АСР как скорректированный объект регулирования

Динамические показатели АСР проявляются только в неустановившемся состоянии. Поэтому их можно выявить по реакции АСР на стандартные воздействия по каналам задания $x_{зад}$ или возмущения, т.е. по переходным процессам в ней. Примеры переходных процессов в АСР — изменение рассогласования Δx при скачкообразном воздействии по каналу задания (на значение $\Delta x_{зад}$) и каналу возмущения — приведены на рис. 3.5.

Какие свойства АСР являются идеальными с точки зрения качества стабилизации параметра? Ясно, что в идеальной АСР любые возмущающие воздействия не должны вызывать рассогласования. Это означает, что идеальная АСР должна быть нечувствительной к возмущениям. Отсюда следует, что в идеальной АСР статическая ошибка отсутствует, а переходный процесс таков, что площадь, заштрихованная на рис. 3.5, равна нулю.

Идеальные переходные процессы в реальных АСР практически недостижимы. По отклонению переходного процесса в реальной АСР от идеального можно судить о качестве ее работы. Для количественной оценки качества работы АСР служат показатели качества регулирования (качества переходных процессов). Одним из таких показателей в установившемся состоянии АСР является уже упоминавшаяся статическая ошибка. Наиболее

универсальный динамический показатель, характеризующий близость АСР к идеальной, — абсолютное значение площади переходного процесса (на рис. 3.5, *а* эта площадь заштрихована).

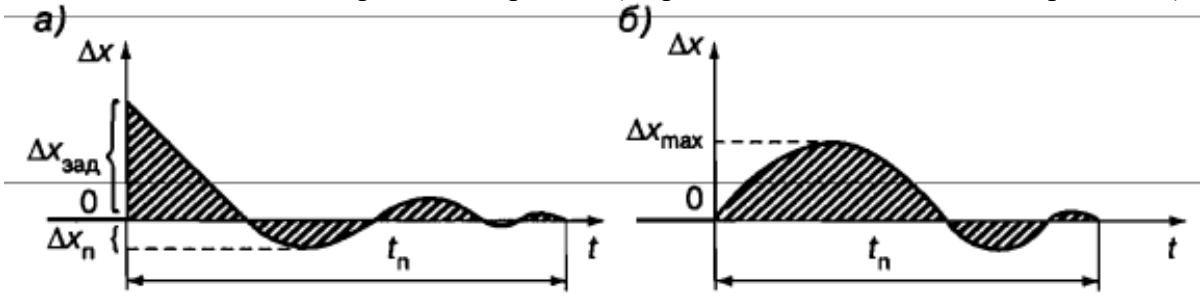


Рис. 3.5. Переходные процессы в АСР при скачкообразных входных воздействиях: а— по каналу задания; б — по каналу возмущения

Наряду с абсолютной величиной площади переходного процесса часто используют такой показатель, как квадрат этой площади (при этом автоматически не учитывается знак отклонения). Оба этих показателя характеризуют одновременно и величину, и длительность рассогласования в переходном процессе. Иногда важнее длительность переходного процесса — в частности, когда требуется перевести объект управления в новое состояние за минимальное время. В этом случае за показатель качества регулирования принимают время переходного процесса $t_п$.

В некоторых случаях главную роль играет величина рассогласования в переходном процессе. Тогда показателем качества регулирования считают максимальное рассогласование $Дх_{max}$, называемое динамической ошибкой. В реальных условиях лучше вводить стандартное воздействие $Δx_{зад}$ по каналу задания. Такие переходные процессы характеризуются теми же показателями качества, за исключением динамической ошибки. Вместо нее вводят другой показатель — перерегулирование $Ах_п$, определяемый, как показано на рис. 3.5, *а.* Указанные показатели качества равны нулю для идеальной АСР и больше нуля для любой реальной АСР. Чем эти показатели меньше, тем ближе АСР к идеальной.

Свойства любой АСР и качество переходных процессов в ней зависят как от свойств объекта, так и от характеристик остальных элементов АСР. Поэтому, изменяя характеристики отдельных элементов АСР, в частности регулятора, можно добиться наилучшего возможного в данных условиях качества переходного процесса (например, минимального времени переходного процесса). Такая АСР будет наилучшей из всех возможных для данного объекта регулирования, и ее называют оптимальной. Не следует смешивать понятия оптимальности и идеальности. Идеальная АСР практически недостижима, а оптимальная — это наилучшее приближение к идеальной.

Разработка и построение оптимальных АСР обычно связаны со значительными трудностями, а сами эти АСР оказываются сложными и дорогими. Однако замечено, что даже большие отступления от оптимальной АСР обычно приводят к незначительному ухудшению качества регулирования. Такие отступления практически неизбежны, так как свойства, как правило, известны лишь приближенно и изменяются с течением времени, а при изготовлении регуляторов и других элементов АСР неизбежен разброс их параметров. Поэтому в большинстве случаев требуется наладка АСР на действующем объекте. С этой целью регуляторы снабжают органами регулировки, позволяющими изменять их настройку в достаточно широком диапазоне.

Наладка АСР на действующем объекте требует высокой квалификации. Регулируемый параметр АСР под действием случайных возмущений колеблется около своего задания. В этих условиях трудно проследить влияние параметров настройки регулятора на показатель качества и определить, в какую сторону и насколько следует их изменять. Ясно, что чем меньше параметров настройки, тем проще процесс наладки АСР. Однако сложные современные АСР (комбинированные, многоконтурные) могут иметь достаточно

много параметров настройки. И этом случае уже бессильны опыт и интуиция самого квалифицированного специалиста.

Системы, способные автоматически находить и поддерживать оптимальные значения параметров настройки, называются **самонастраивающимися**. Такие системы содержат элементы (устройства), автоматически изменяющие параметры настройки в нужную сторону. Иначе говоря, самонастраивающиеся АСР автоматически изучают свойства объекта и возмущающих воздействий и приспосабливаются к ним. Вообще автоматические системы, обладающие способностью к самообучению, называются самообучающимися или адаптивными. Самонастраивающиеся АСР — лишь один из видов адаптивных систем. Другим частным случаем адаптивных систем являются так называемые экстремальные, которые не только стабилизируют регулируемый параметр около его задания, но и автоматически выбирают задание, наилучшее (оптимальное) для всей технологической системы.

3.3. Основные законы автоматического регулирования и типы регуляторов

При неизменных свойствах объекта качество регулирования в АСР зависит от свойств остальных се элементов, в первую очередь регулятора. Свойства регулятора определяются характером преобразования его входного сигнала Ах в выходной *z*.

Так, для АСР уровня в емкости (см. рис. 3.6) регулятором является рычаг 5. При изменении уровня в емкости, например, при его увеличении, поплавок *3* поднимается и поворачивает рычаг 5, который через шток *4* прикрывает клапан *1,* уменьшая приток жидкости в емкость *2*. В этой АСР исполнительный механизм отсутствует и выходной сигнал регулятора *z* одновременно является входным сигналом регулирующего органа — степенью открытия клапана. В этом регуляторе перемещение штока пропорционально перемещению поплавка. Следовательно, выходной сигнал этого регулятора пропорционален входному — отклонению уровня от заданного значения.

Существуют регуляторы, имеющие и другие зависимости выходного сигнала от входного. Характер зависимости выходного сигнала регулятора от входного, т.е. закон, по которому его входной сигнал преобразуется в выходной, называется законом регулирования.

Как известно, несмотря на большое разнообразие объектов регулирования, характерные их свойства, имеющие существенное значение для целей управления, немногочисленны, как и сами способы управления объектами. Это объясняется общностью физических законов, которым подчиняются различные процессы, протекающие в объектах и системах регулирования. Подобная универсальность присуща и законам регулирования для самых различных объектов. Используя весьма небольшое число типовых законов регулирования, можно достаточно качественно управлять почти всеми СВВ. При этом для каждого объекта достаточно подобрать лишь параметры настройки регулятора. Применение таких типовых законов регулирования позволяет использовать в АСР стандартные, серийные регуляторы, что имеет неоспоримые достоинства. Когда (при высоких требованиях к качеству АСР, сильно изменяющихся свойствах объектов) типовые законы регулирования оказываются неэффективными, прибегают и к более сложным законам.

Свойства регулятора проявляются, как и свойства объектов регулирования и АСР, в реакции на скачкообразное входное воздействие Δx, показанное на рис. 3.6, *а.* Рассмотрим типовые законы регулирования и области их применения.

Наиболее простым является такой закон регулирования, при котором выходной сигнал регулятора *z* линейно зависит от входного Δx:

$$Z = Z_0 + \Delta x, \qquad (3.1)$$

где *к* — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом передачи регулятора, а Z_0 — постоянная составляющая сигнала *z*.

Как видно из формулы (3.1), Z_0— это такое значение выходного сигнала регулятора, при котором рассогласование Δx на его входе равно нулю. Закон регулирования, выраженный формулой (3.1), называется пропорциональным. Сокращенно говорят, что это П-закон регулирования, а сам регулятор называют пропорциональным или П-регулятором.

Этот закон действует, например, при регулировании уровня в емкости, где регулирующее воздействие — степень открытия клапана — пропорционально перемещению поплавка, т.е. отклонению уровня в емкости от его задания. Переходный процесс в П-регуляторе — изменение его выходного сигнала *z* при скачкообразном изменении входного сигнала Δx — приведен на рис. 3.6. Как видно из формулы (3.1), в П-регуляторе имеются два настроечных параметра: величина постоянной составляющей и коэффициент передачи регулятора В регуляторе уровня роль постоянной Z_0 играет длина штока, так как ею определяется степень открытия клапана *z* при отсутствии рассогласования, т.е. при Δx = 0. Коэффициентом передачи регулятора *к* является отношение плеч рычага от поплавка до оси поворота и от штока до этой оси. Действительно, при изменении одного из плеч рычага, например, удалении поплавка от оси поворота, отклонению уровня от заданного значения будет соответствовать меньшее перемещение клапана, т.е. *к* уменьшится.

Почти всем объектам в СВВ в той или иной мере присуще запаздывание, особенно переходное. Запаздывание ухудшает качество регулирования в АСР с обратной связью. Физически это можно объяснить тем, что возмущающее воздействие на объект с запаздыванием не сразу сказывается в рассогласовании; следовательно, регулятор реагирует на возмущающее воздействие также с запаздыванием. В результате и регулирующее воздействие запаздывает по отношению к вызвавшему его возмущающему воздействию. Таким образом, регулирующее воздействие по П-закону как бы оказывается несвоевременным и неспособным поэтому эффективно скомпенсировать действие возмущений.

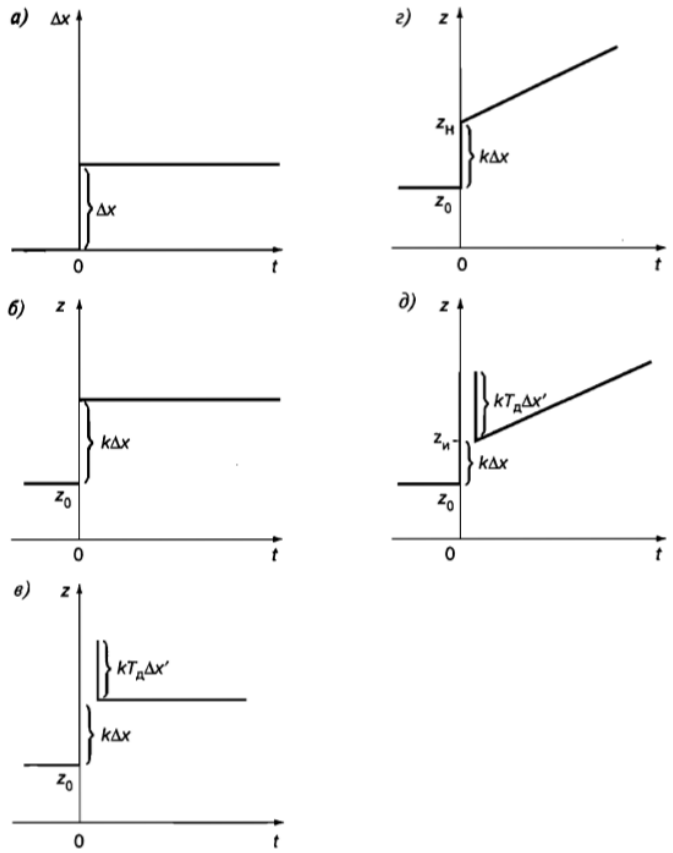


Рис. 3.6. Переходные процессы в регуляторе при скачкообразном входном воздействии: а - входное воздействие; б - П-регулятор; в - ПД-регулятор; г - ПИ-регулятор; д - ПИД-регулятор

С увеличением глубины обратной связи (ростом к) регулирующее воздействие увеличивается и его несвоевременность проявляется все сильнее, что, в конце концов, вызовет неустойчивость АСР. Поэтому для объектов со значительным запаздыванием не

удается получить требуемое качество регулирования. Этот недостаток П-закона регулирования сужает область его применения. Закон можно усовершенствовать, если в нем учитывать тенденцию изменения рассогласования в будущем. Для этого используется скорость изменения рассогласования Δx. Такой регулятор будет иметь способность к предварению, т. е. он будет реагировать на рассогласование с опережением по времени. Предварение — явление, противоположное запаздыванию, и поэтому может его скомпенсировать.

Закон регулирования в регуляторе с предварением включает в себя еще одно слагаемое, пропорциональное скорости изменения рассогласования Δx:

$$z = z_0 + k(\Delta x + T_Д \Delta x') \qquad (3.2)$$

где $T_Д$ — постоянный коэффициент

В математике нахождение скорости изменения некоторой переменной величины называется дифференцированием. Поэтому такой закон регулирования — пропорционально-дифференциальный (сокращенно — ПД-закон регулирования и ПД-регулятор). Слагаемое $k\Delta x$ называется пропорциональной или П-составляющей, а слагаемое $кT_Д\Delta x'$ — дифференциальной или Д-составляющей. Коэффициент $T_Д$ в дифференциальной составляющей всегда положителен и имеет размерность времени. Поэтому он получил название времени дифференцирования или времени предварения.

Если рассогласование $\Delta x'$ не изменяется, то его скорость $\Delta x'$ равна нулю и, как видно из формул (3.1) и (3.2), в этом случае ПД-закон регулирования действует так же, как П-закон. Следовательно, действие Д-составляющей проявляется лишь в неустановившемся состоянии АСР, пока рассогласование изменяется во времени. В ПД-регуляторе в сравнении с П-регулятором добавляется еще один настроечный параметр — время предварения $T_Д$. Переходный процесс в ПД-регуляторе показан на рис. 3.6, *в*.

Из сравнения графиков ПД-закона регулирования и П-закона видно, что первый характеризуется наличием импульса, возникающего в момент скачка рассогласования. Появление этого импульса объясняется тем, что скорость $\Delta x'$ в момент скачка рассогласования бесконечно велика. Поэтому слагаемое $кT_Д\Delta x'$ в формуле (3.2), а значит, и выходной сигнал регулятора *z* в этот момент достигают очень больших значений.

Чтобы нагляднее увидеть эффект предварения в ПД-регуляторе, рассмотрим его реакцию не на скачкообразное, а на постепенное изменение рассогласования с постоянной скоростью (рис. 3.7). Пунктиром на этом графике показана П-составляющая закона регулирования, изменение которой подобно изменению рассогласования.

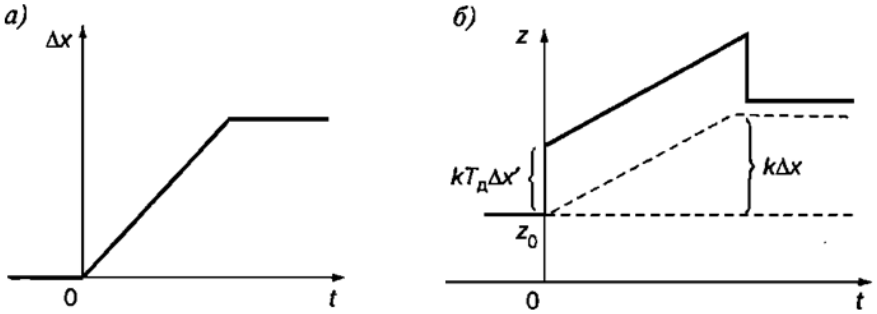


Рис. 3.7. Переходный процесс в ПД-регуляторе при постепенном изменении входного воздействия: а — входное воздействие; б — переходный процесс

Дифференциальная составляющая увеличивает выходной сигнал регулятора *z* в течение всего времени, пока увеличивается рассогласование. Чем быстрее оно изменяется, тем больше увеличение выходного сигнала ПД-регулятора по сравнению с П-регулятором. Понятно, что в случае уменьшения рассогласования выходной сигнал регулятора уменьшался бы. Такое форсированное изменение выходного сигнала ПД-регулятора позволяет эффективнее компенсировать действие возмущений на объекты с запаздыванием.

Итак, ПД-закон регулирования расширяет область применения П-закона на объекты со значительным запаздыванием. При этом следует иметь в виду, что дифференцирование рассогласования не является идеальным его предварением и поэтому не может полностью устранить вредное влияние запаздывания сигнала в контуре обратной связи АСР. В особенности это касается транспортного запаздывания, когда входное воздействие в течение всего времени запаздывания никак не проявляется в рассогласовании Ах, а следовательно, и в скорости его изменения Ах'. Может оказаться, что для таких объектов не только ПД, но и никакой другой закон регулирования не обеспечит требуемого качества АСР. Это тот случай, когда обратная связь как способ регулирования по отклонению оказывается бессильной. Выход из положения — применение дополнительного регулирующего воздействия по возмущению, т. е. комбинированной АСР.

П- и ПД-законы регулирования являются статическими: установившееся рассогласование (статическая ошибка) в АСР с П- и ПД-регулятором не равно нулю. На это уже обращалось внимание в примере регулирования уровня в емкости. Дальнейшее совершенствование П- и ПД-регуляторов заключается в придании им свойства астатизма, т. е. способности устранять с течением времени статическую ошибку АСР. Примером такого регулятора может служить регулятор давления воздуха в ресивере.

3.4. Настройка автоматических регуляторов

Как уже отмечалось, АСР обычно нуждаются в настройке для достижения требуемого качества регулирования. С этой целью в серийных регуляторах предусмотрены органы настройки, позволяющие изменять в широком диапазоне параметры типовых законов регулирования: коэффициент передачи K, время интегрирования $Г_и$ и время предварения $Г_д$. Для определения параметров настройки создают стандартные воздействия и наблюдают переходные процессы, так как по виду последних можно судить о качестве регулирования.

Рассмотрим влияние параметров настройки на вид и показатели качества переходных процессов в АСР (рис. 3.8). Для определенности примем, что скачкообразное стандартное воздействие величиной АХзад приложено по каналу задания. Вначале проследим влияние коэффициента передачи регулятора *к* при отсутствии Ии Д-составляющих в законе регулирования (П-регулятор). С увеличением коэффициента передачи увеличивается глубина обратной связи в АСР и переходный процесс, вначале апериодический (неколебательный) и растянутый во времени (рис. 3.8, *а*), постепенно уменьшается (рис. 3.8, *б)* и затем переходит в затухающий колебательный (рис. 3.8, *в).* При дальнейшем увеличении коэффициента передачи колебательный переходный процесс растягивается во времени (рис. 39, *г)* и превращается в незатухающие колебания (рис. 39, *д).* Возникновение незатухающих колебаний свидетельствует о достижении границы устойчивости замкнутой системы.

Колебания регулируемого параметра в объекте обычно нежелательны, и чем быстрее они затухают, тем лучше качество регулирования. Поэтому вводят дополнительный показатель качества регулирования — степень затухания колебательного переходного процесса, который характеризует скорость уменьшения амплитуды колебаний (см. пунктирную линию на рис. 3.8, *г).* Для апериодического переходного процесса, в котором колебания отсутствуют, степень затухания максимальна (рис. 3.8, а, б), а для незатухающих колебаний, возникающих при работе АСР на границе устойчивости, — равна нулю (рис. 3.8, б).

Дальнейшее увеличение коэффициента передачи регулятора выводит АСР за границу устойчивости, что проявляется в самопроизвольном нарастании амплитуды колебаний (рис. 3.8, *е*). При этом все показатели качества регулирования теряют смысл. Таким образом, для нормальной работы АСР прежде всего необходимо обеспечить ее устойчивость, и только после этого можно говорить о качестве переходных процессов.

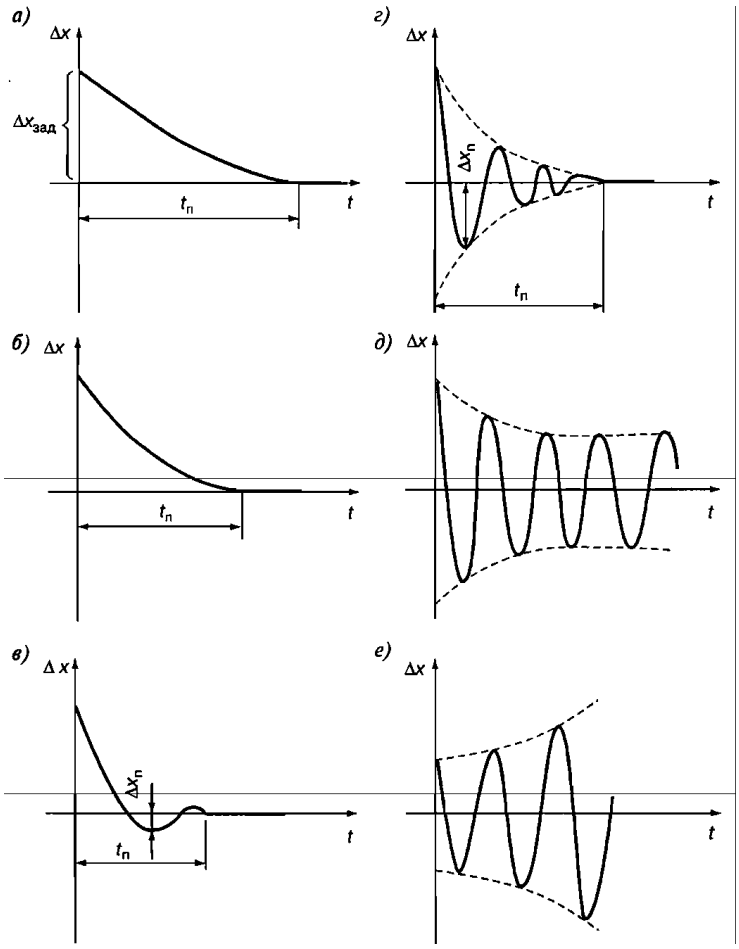


Рис. 3.8. Переходные процессы в замкнутой АСР при изменении параметров настройки регулятора

Как видно из переходных процессов на рис. 3.8, с ростом коэффициента передачи регулятора площадь и время переходного процесса t_n сначала уменьшаются, а затем увеличиваются и при работе АСР на границе устойчивости становятся бесконечно большими. Степень затухания колебательного переходного процесса все время уменьшается, вплоть до возникновения незатухающих колебаний. Перерегулирование $Дх_п$ сначала равно нулю (рис. 3.8, *а, б),* а затем увеличивается и приближается к величине $Дх_{зад}$. Лучшее качество регулирования достигается при работе АСР вблизи границы устойчивости. Однако следует иметь в виду, что АСР с П-регулятором имеет статическую ошибку, которая может оказаться недопустимо большой даже вблизи границы устойчивости, т. е. при максимально возможном коэффициенте передачи П-регулятора.

Рассмотрим теперь влияние И-составляющей закона регулирования на качество переходных процессов в АСР. Уменьшение времени интегрирования $T_и$ в ПИ-регуляторе, как и увеличение коэффициента передачи, приводит к увеличению глубины обратной связи. При этом вид переходных процессов и показатели их качества изменяются примерно так же, как и при увеличении коэффициента передачи (в последовательности на рис. 3.8, *а-д).* При введении И-составляющей статическая ошибка исчезает, но при этом затухающие колебания возникают раньше. В результате граница устойчивости АСР достигается при меньших значениях коэффициента передачи, чем при отсутствии И-составляющей.

Поэтому говорят, что введение И-составляющей уменьшает запас устойчивости системы.

Таким образом, увеличению глубины обратной связи в АСР (увеличению коэффициента передачи и уменьшению времени интегрирования) с целью улучшения качества регулирования препятствует возникновение неустойчивости в замкнутой системе

регулирования. Поэтому для объектов с неблагоприятными динамическими свойствами часто не удается обеспечить требуемое качество регулирования при использовании регуляторов, имеющих только П- и И-составляющие.

Увеличить степень затухания колебаний в переходном процессе при неизменных параметрах настройки и П- и И-составляющих позволяет введение Д-составляющей. Иначе говоря, введение Д-составляющей в закон регулирования как бы отодвигает границу устойчивости АСР и увеличивает запас ее устойчивости. Поэтому для управления объектами с неблагоприятными динамическими свойствами применяют ПИД-регуляторы.

При настройке регулятора АСР стандартные воздействия по каналу задания создают скачкообразным изменением сигнала задания, а по каналу возмущения — скачкообразным перемещением регулирующего органа. При этом величина стандартного воздействия, с одной стороны, должна быть достаточно большой, чтобы переходный процесс четко выделялся на фоне случайных колебаний регулируемого параметра, а с другой — достаточно малой, чтобы не вызвать недопустимых нарушений технологического регламента. Эти противоречивые требования затрудняют настройку АСР по переходным процессам в производственных условиях и требуют от наладчика определенных навыков и квалификации.

3.5. Классификация систем автоматического регулирования

В системах автоматизации для перемещения регулирующих органов и формирования алгоритмов регулирования используют различные виды энергии (электрическая, пневматическая, гидравлическая). Отдельный класс составляют регуляторы, не потребляющие энергию от внешнего источника, а использующие энергию регулируемой среды. Такие регуляторы называются регуляторами прямого действия. Они просты по конструкции, но, как правило, не позволяют получить требуемый закон регулирования и достаточную мощность выходного сигнала для регулирующего органа (РО). Поэтому в сложных системах регулирования применяются регуляторы непрямого действия, для работы которых необходим источник энергии. Устройства, потребляющие энергию одного рода, образуют в Государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) единую структурную группу или «ветвь ГСП». При автоматизации СВВ наиболее широко применяют регуляторы двух ветвей ГСП: электрическую и пневматическую.

В электрической ветви в настоящее время существует несколько систем регуляторов. Наибольшее распространение получила электронная агрегатная унифицированная система (ЭАУС). Каждый регулятор ЭАУС состоит из двух блоков: измерительного и формирующего. Измерительный блок предназначен для алгебраического суммирования входных сигналов регулятора и пропорционального преобразования регулирующего сигнала (рассогласования) в напряжение постоянного тока. Формирующий блок служит для преобразования этого напряжения в выходной сигнал по заданному закону регулирования.

Регуляторы ЭАУС работают с регулирующими органами, снабженными электрическими исполнительными механизмами (ЭИМ), электродвигатели которых рассчитаны на напряжение определенной величины и имеют постоянную скорость вращения. Поэтому регулирующий орган ЭИМ может перемещаться с постоянной скоростью (при включенном электродвигателе) или оставаться в неподвижном положении (при выключенном электродвигателе).

Изменять скорость перемещения РО можно лишь в режиме периодического включения и выключения ЭИМ путем подачи на электродвигатель импульсов напряжения постоянной амплитуды. При этом РО будет перемещаться не непрерывно, а скачками. Если же импульсы напряжения следуют достаточно часто друг за другом, то скачкообразное перемещение РО будет восприниматься объектом как непрерывное управляющее воздействие. Однако наличие в ряде элементов ЭАУС контактов, снижающих надежность, трудность изменения скорости хода ЭИМ и опасность применения электрических устройств то взрывоопасных условиях ограничивают использование таких систем.

Приборы пневматической ветви ГСП характеризуются безопасностью применения во взрывоопасных средах, простотой устройства, безопасностью обслуживания, высокой надежностью, низкой стоимостью и большими функциональными возможностями. Пневматические системы особенно удобны для крупных СВВ при большом количестве автоматизированных объектов, так как требуют менее квалифицированного обслуживания, чем электрические.

Пневматические регуляторы (ПР) создают из унифицированных элементов и модулей, каждый из которых выполняет какую-либо простую операцию. Главной частью пневматической ветви ГСП Является система «Старт», регуляторы которой предназначены для работы с РО, снабженными пневматическим исполнительным механизмом (ПИМ), и используют унифицированные пневматические сигналы. Основными в системе «Старт» являются регуляторы: позиционные релейные — ПР1.5, ПР1.6; пропорциональные (П) — ПР2.5, ПР2.8; пропорционально-интегральные (ПИ) — ПР3.21, ПР3.22, ПР3.23, ПР3.31; пропорционально-интегрально дифференциальные (ПИД) — ПР3.25, ПР3.35, а также функциональные элементы, осуществляющие алгебраическое сложение, умножение и деление сигналов, — ПФ1.1, усиление, — П1.5, ограничение, — ПФ11.1, переключение и др. Использование регуляторов и элементов системы «Старт» позволяет создавать любые сложные регулирующие системы. В СВВ их применяют для регулирования давления, температуры, уровня и других параметров, а в ряде случаев и в комбинации с элементами электрической ветви ГСП.

Ранее уже отмечалось, самостоятельную ветвь ГСП составляют регуляторы прямого действия, работающие без использования вспомогательной энергии. Эти регуляторы широко применяются при автоматизации СВВ. Их достоинства — в автономности (не требуются источники питания), высокой надежности (минимальное число элементов), а также простоте изготовления, монтажа и ремонта.

3.6. Микропроцессорные регуляторы

В последнее время в АСР стала применяться вычислительная техника, на основе которой созданы программируемые микропроцессорные регуляторы «Ремиконт». Один такой регулятор может заменить несколько десятков обычных электрических регуляторов. Например, «Ремиконт-100» заменяет 64 регулятора. Он имеет 64 входа для подключения измерительных устройств и столько же выходов для управления исполнительными механизмами.

Входным сигналом «Ремиконта» является постоянный ток, изменяющийся в диапазоне 0—5 мА (унифицированный сигнал ГСП).

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-СЛ1-М (рис. 3.9, *а)* или из термопары и преобразователя НП-ТЛ1-М (рис. 3.9, *б*). При регулировании расхода измерительная цепь будет включать диафрагму и дифманометр с токовым выходом ДМ-Э (рис. 3.9, *в)* или ротаметр РЭД и преобразователь НП-ПЗ (рис. 3.9, г).

Применение «Ремиконта» не устраняет необходимости в приборах для регистрации регулируемых параметров. По этим приборам ведут настройку регуляторов, а также ручное дистанционное управление. Унификация входных сигналов «Ремиконта» позволяет использовать однотипные одно- и многоточечные приборы типа КСУ для измерения постоянного тока в диапазоне 0—5 мА.

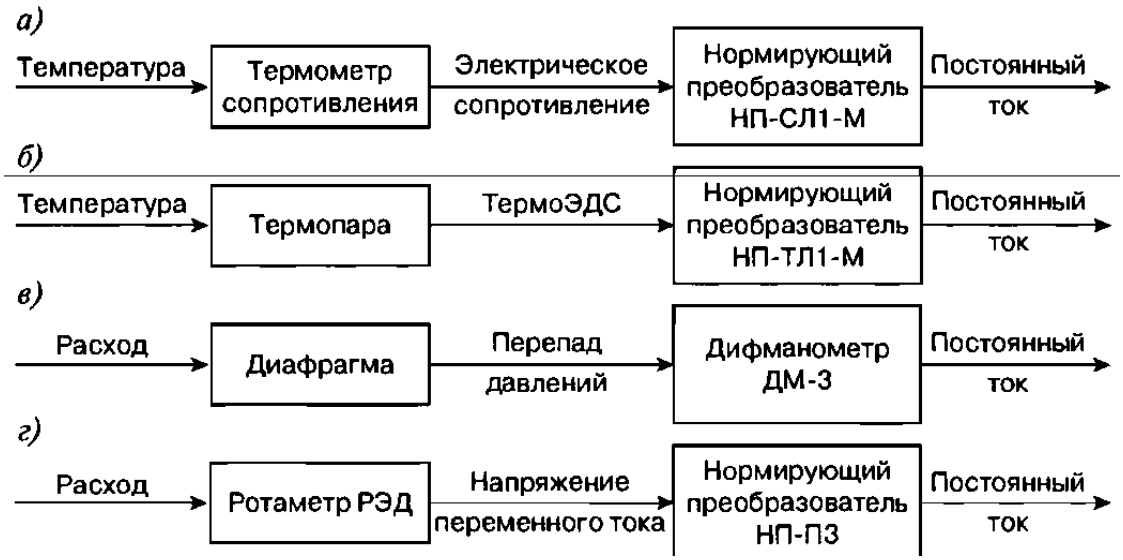


Рис. 3.9. Примеры измерительных цепей регулятора «Ремиконт»:
А) с термометром регулирования; б) с термопарой; в) с диафрагмой; г) с ротаметром

Регулятор «Ремиконт» состоит из двух частей: собственно, регулятора *Р* и пульта оператора *ПО* (рис. 3.10). Все логические операции в вычислительном устройстве (ВУ) регулятора выполняются в цифровой форме. Поэтому входные аналоговые сигналы регулятора предварительно преобразуются в цифровые сигналы. Для этого служит аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

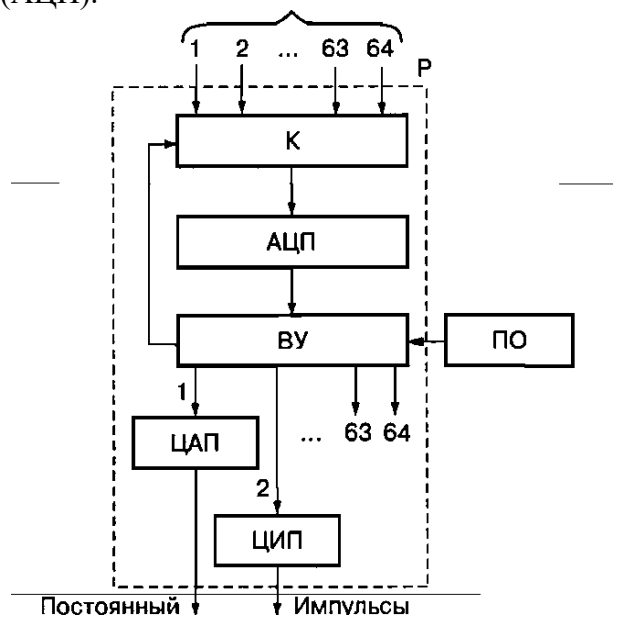


Рис. 3.10. Структурная схема регулятора «Ремиконт»:
Р — регулятор; ПО — пульт оператора; ВУ — вычислительное устройство; К — коммутатор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ЦИП — цифроимпульсный преобразователь

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.

Входные сигналы «Ремиконта» *1—64* 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 «Ремиконте» 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.

«Ремиконт» позволяет также производить нелинейные преобразования сигналов (например, возведение в квадрат сигнала расходомера переменного перепада давления), сигнализировать превышение максимально допустимой величины рассогласования, организовать связи между отдельными каналами для реализации комбинированных АСР. Все эти возможности «Ремиконта» 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 «Ремиконта» 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 «Ремиконта» через электропневматический преобразователь ЭПП-63 и панель дистанционного управления ПДУ. Эта панель позволяет подавать на исполнительный механизм командное давление сжатого воздуха в диапазоне $(0{,}2—1)10^5$ Па от ЭПП-63 в режиме автоматического управления (рис. 43.11, *а)* или от задатчика в режиме ручного управления (рис. 3.11, *б).* Выбор режима управления производится поворотом переключателя. В первом случае задатчиком по манометру устанавливается давление питания $p_{пш}$ преобразователя ЭПП-63 • 10^5 Па. Во втором — оператор устанавливает задатчиком давление $p_к$ на исполнительном механизме так, чтобы показания измерительного прибора соответствовали заданной величине регулируемого параметра.

Цифроимпульсные преобразователи ЦИП предназначены для управления электрическими исполнительными механизмами ЭИМ, которые подключают к выходу «Ремиконта» через тиристорные пускатели.

В регуляторе «Ремиконт» 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 микроЭВМ, на понятном ему языке.

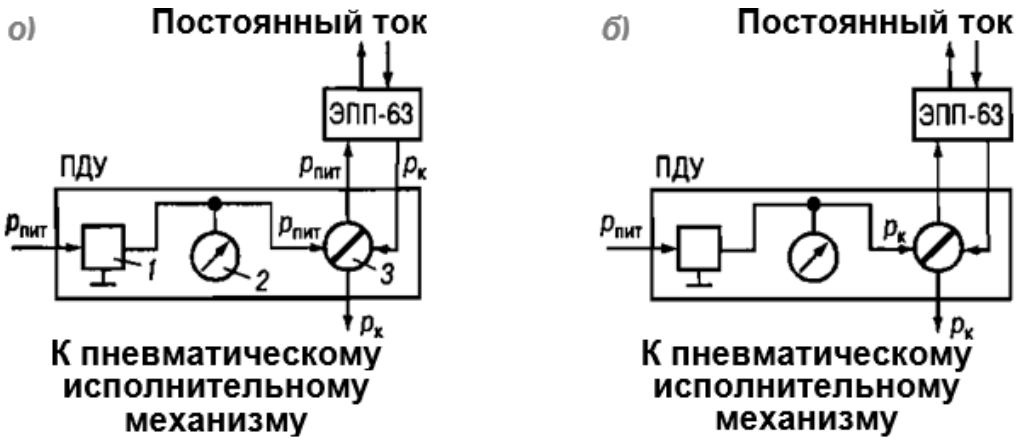


Рис. 3.11. Схема соединения регулятора «Ремиконт» с пневматическим исполнительным механизмом: а — режим «автоматическое управление»; б — режим «ручное управление»; ПДУ- панель дистанционного управления; ЭПП-63 — электропневмопреобразователь; 1 — задатчик; 2 — манометр; 3 — переключатель режима управления

3.7. Регулирующие органы и исполнительные 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 такого органа. Проходное сечение дроссельного регулирующего органа изменяют, открывая или закрывая его. Расход вещества через такой 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.

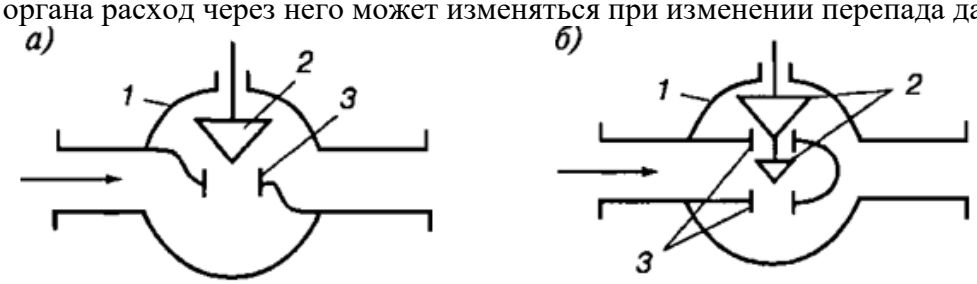


Рис. 3.12. Регулирующие клапаны: а — односедельный; 6 — двухседельный; 1 — корпус; 2 — плунжер; 3 — седло

К числу дроссельных регулирующих органов относятся односедельные, двухседельные и диафрагмовые клапаны, а также заслонки. В односедельных и двухседельных регулирующих клапанах (рис. 3.12) изменение проходного сечения производится перемещением одного или двух плунжеров относительно седла. 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. У двухседельного же 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 диафрагменных клапанах (рис. 3.13) проходное сечение изменяется в результате перемещения центра диафрагмы относительно перегородки в корпусе клапана.

В трубопроводах большого сечения для управления потоками газа и пара применяют поворотную заслонку (рис. 3.14). Основной элемент заслонки — круглый диск, укрепленный на оси и помещенный в корпусе. Поворотом диска изменяется площадь проходного сечения между заслонкой и корпусом. Если диск находится в плоскости, перпендикулярной к оси корпуса, то проходное сечение равно нулю.

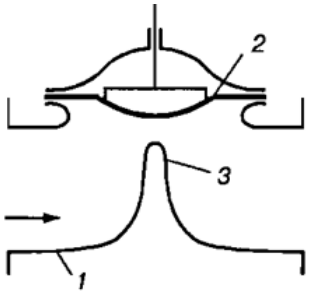


Рис. 3.13. Диафрагменный клапан: 1 — корпус; 2 — диафрагма; 3 — перегородка

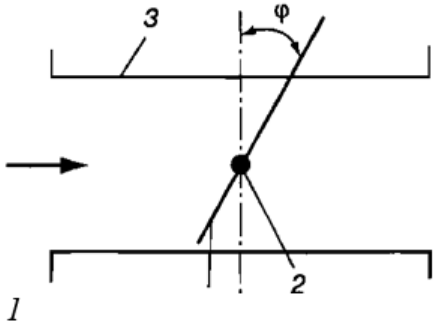


Рис. 3.14. Поворотная заслонка: 1 — диск; 2 — ось; 3 — корпус

По мере поворота диска площадь 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 • 105 Па. Этот расход (в м3/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 диафрагменные 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.

Исполнительный механизм преобразует выходной сигнал регулятора в перемещение регулирующего органа. По виду используемой энергии исполнительные механизмы делятся на пневматические, гидравлические и электрические. В инженерных системах наибольшее применение получили пневматические и электрические исполнительные механизмы.

Пневматические исполнительные механизмы. Эти механизмы (рис. 3.15) преобразуют входное давление *p* в прогиб мембраны и перемещение / связанного с ней штока. Мембрана (обычно резинотканевая) герметично заделана по краю между верхней и нижней крышками. Центральная часть мембраны опирается на жесткий центр. Благодаря противодействию пружины статическая характеристика исполнительного механизма, т. е. зависимость перемещения / от давления р, линейна.

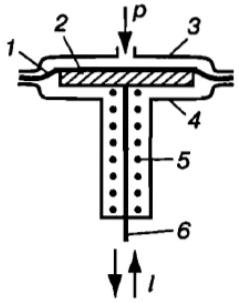


Рис. 3.15. Мембранный исполнительный механизм
1 — мембрана; 2 — жесткий центр; 3,4— крышки; 5 — пружина; 6 — шток

Обычно пневматические исполнительные механизмы применяют для управления регулирующими клапанами и их выпускают как одно устройство — пневматический регулирующий клапан. Имеются два вида пневматических регулирующих клапанов: нормально открытые (НО) и нормально закрытые (НЗ). У первых (рис. 3.16, а) при отсутствии давления воздуха над мембраной шток под действием пружины переходит в крайнее верхнее положение и плунжер при этом полностью открывает клапан. С повышением давления воздуха проходное сечение такого клапана уменьшается. У вторых (рис. 3.16, б) при отсутствии давления воздуха проходное сечение полностью перекрыто и клапан открывается лишь при появлении давления над мембраной.

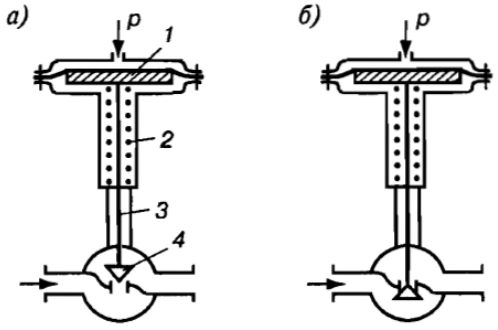


Рис. 3.16 Пневматический регулирующий
клапан: а - нормально открытый; б - нормально закрытый;
1 - мембрана; 2 - пружина; *3* - шток; 4 - плунжер

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 выход ном валу и скоростью его поворота при включенном электродвигателе.

В состав электрического исполнительного механизма (рис. 3.17) обычно входят следующие основные элементы: реверсивный электродвигатель, ручной привод, концевые и путевые выключатели, тормозное устройство и датчик положения выходного вала. Электродвигатель с редуктором служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для перемещения регулирующего органа. Маховик необходим для перемещения выходного вала исполнительного механизма вручную при выходе из строя тиристорного пускателя или электродвигателя.

В исполнительном механизме имеются вспомогательные устройства, обеспечивающие преобразование угла поворота выходного вала в электрические сигналы различного назначения. Дифференциально-трансформаторный преобразователь 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 используется для работы дистанционного указателя положения исполнительного механизма, устанавливаемого на щите оператора рядом с кнопками ручного дистанционного управления.

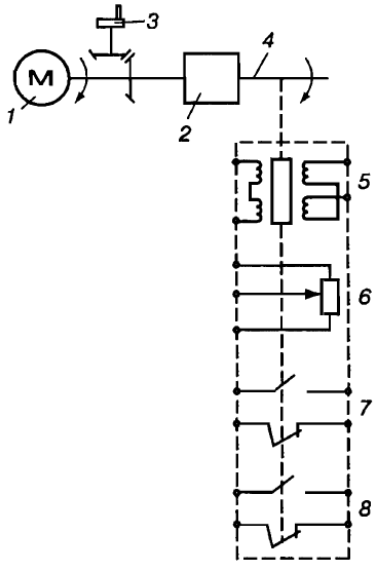


Рис. 3.17. Электрический исполнительный механизм:
1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — маховик; 4 — выходной вал исполнительного механизма; 5 — дифференциально-трансформаторный преобразователь; 6 — реостатный преобразователь; 7 — концевые выключатели; 8 — путевые выключатели

Концевые выключатели выполняют защитные функции. Они отключают тиристорный пускатель при достижении регулирующим органом крайних положений. Путевые выключатели служат для ограничения диапазона перемещения регулирующего органа. В автоматическом режиме работы они отключают пускатель при выходе за пределы установленного диапазона.

Тормозное устройство в таких механизмах необходимо для уменьшения выбега выходного вала после прекращения действия Управляющих импульсов. Обычно тормозное

устройство снабжается электромагнитным приводом, который работает следующим образом: при появлении силового напряжения на электродвигателе появляется ток и в обмотке электромагнита. Якорь втягивается и отводит тормозную колодку от вала электродвигателя. При Исчезновении силового напряжения электромагнит обесточивается и вал электродвигателя тормозится колодкой, которая прижимается к нему пружиной.

3.8. Схемы автоматического регулирования типовых технологических параметров

3.8.1. 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. 3.1. В верхнюю половину окружности, обозначающей элемент измерительной цепи или регулятор, сначала записывают обозначения измеряемых или регулируемых параметров (табл. 3.2) и, если это необходимо, их уточнение (табл. 3.3), а затем — обозначения основных функций, выполняемых этим устройством (табл. 3.4). В табл. 5.5 приведены некоторые дополнительные обозначения, применяемые для конкретизации основных обозначений, входящих в табл. 3.4. Эти обозначения приводят на функциональной схеме справа от обозначения устройства.

Таблица 3.1.

Условное обозначение средств автоматизации

Название	Обозначение
Датчик, промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, магнитный или тиристорный пускатель и другие устройства, установленные на аппарате, трубопроводе или около них	
Промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, кнопка, переключатель и другие устройства, установленные на щите управления	
Исполнительный механизм (пневматический, электрический)	

Таблица 3.2.

Условное обозначение параметров

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Давление, разрежение	*P*	Влажность	*M*
Уровень	*L*	Состав, концентрация	*Q*
Расход	*F*	Несколько разнородных параметров	*U*
Температура	*T*		
Плотность	*D*	Электрическая величина	*E*
Вязкость	*V*	Время	*K*
		Положение, перемещение	*G*

Рассмотрим несколько примеров использования условных обозначений. На рис. 3.18, *а* изображен датчик (*E)* температуры (7). Это может быть, например, термопара, термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра и т.п.; на рис. 3.18, *б* — установленный на щите прибор для измерения температуры (7), показывающий (7) и регистрирующий (*R*); на рис. 3.18, *в* — такой же прибор со встроенным в него регулятором (С) и укомплектованный панелью дистанционного управления (НС).

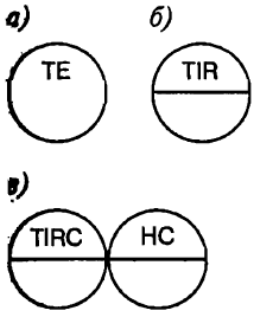


Рис. 3.18. Условные изображения на функциональных схемах средств измерения и регулирования температуры: а — датчик температуры; б — показывающий и регистрирующий прибор; в —- показывающий и регистрирующий прибор с регулятором, укомплектованный панелью дистанционного управления

На рис. 3.19, *а* показан датчик (*E)* расхода (*F*), например диафрагма расходомера переменного перепада давлений или бак расходомера переменного уровня; на рис. 3.19, *б* — промежуточный преобразователь (*T)* расходомера (*F*). Это может быть дифманометр, преобразующий перепад давления на диафрагме (в первом случае) или давление столба жидкости в баке (во втором) в пневматический или электрический промежуточный сигнал. Однако это может быть и ротаметр с дистанционной передачей, у которого преобразователь смонтирован в одном корпусе с датчиком (поплавком). На рис. 3.19, *в* изображен прибор, показывающий (/) и регистрирующий *(К)* величину расхода *(F),* со встроенной станцией управления *(К).* Вместе с прибором на щите установлен регулятор расхода *(FC).*

Таблица 3.3.

Условные обозначения уточнений параметров

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Разность, перепад	*D, d*	Интегрирование	*Q, q*
Соотношение	*F, f*	Автоматическое переключение	*J*

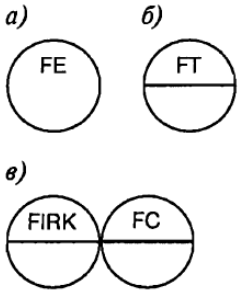


Рис. 3.19. Условные изображения на функциональных схемах средств измерения и регулирования расхода: а — датчик расхода; б — датчик расхода, снабженный промежуточным преобразователем, либо промежуточный преобразователь; в — показывающий и регистрирующий прибор со встроенной станцией управления и регулятор расхода

Таблица 3.4.
Условное обозначение основных функций средств автоматизации

Название	Обозначение
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 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, отключение, переключение	*S*

Таблица 3.5.
Условное обозначение дополнительных функций средств автоматизации

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Верхнее предельное значение параметра	*H*	Извлечение корня	√
Нижнее предельное значение параметра	*L*	Передача сигнала на ЭВМ	B_i
Электрический сигнал	*E*	Вывод информации с ЭВМ	B_0
Пневматический сигнал	*P*		

Обычно все устройства, относящиеся к одной измерительной или регулирующей цепи, обозначают индексом с одинаковой цифрой, но разными буквами. Эти обозначения располагают в нижней половине окружности, изображающей устройство, или около исполнительного механизма. В случаях, когда несколько элементов выпускают в виде одного

устройства (например, мембранный исполнительный механизм с регулирующим клапаном), им присваивают одно общее обозначение. На рис. 3.20 приведен пример функциональной схемы автоматизации нагрева паром воды в 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—46),* температуры воды и пара на входе в теплообменник *(3а—3в).* Кроме того, предусмотрена сигнализация при падении давления пара *(2).*

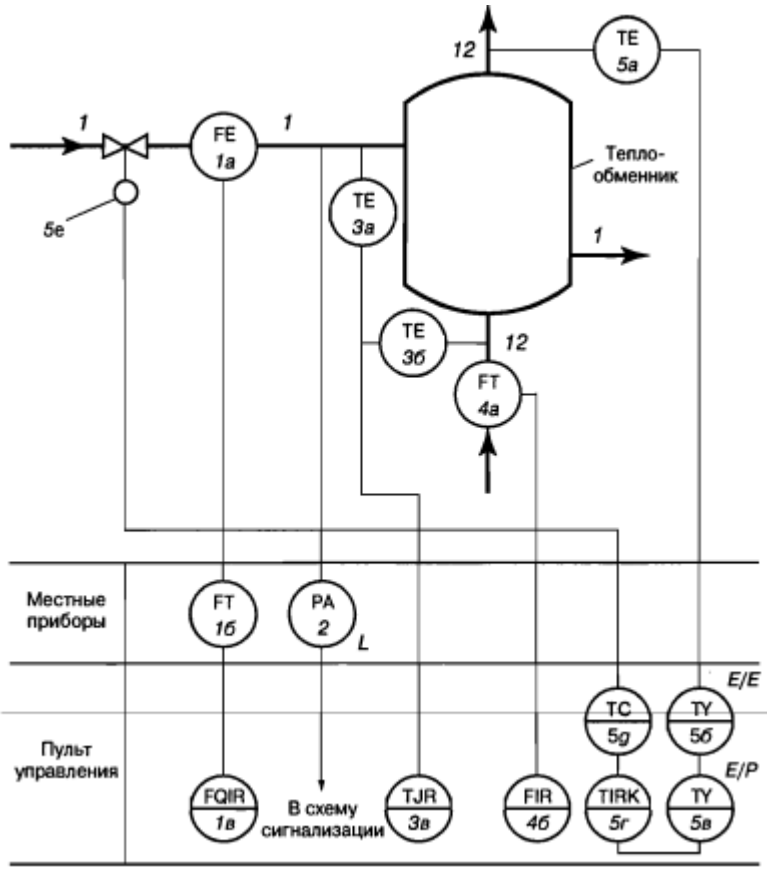


Рис. 3.20. Функциональная схема автоматизации процесса нагревания воды в теплообменнике

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 АСР, механически связанных с технологическими аппаратами и трубопроводами, помещают рядом с изображением соответствующего оборудования *(1а, 3а, 3б, 4а, 5а, 5ё).*

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, измерительные приборы, регуляторы и органы управления — выносят в нижнюю часть схемы. При этом вдоль листа вычерчивают прямоугольники, условно изображающие щиты и пульты. В этих прямоугольниках группируют аппаратуру по принципу общности расположения. Например, все преобразователи и приборы, расположенные рядом с местом измерения, т.е. смонтированные не на оборудовании, а на стенах здания, колоннах, на полу и т.п., располагают в одном прямоугольнике (*16,* 2). В другом прямоугольнике расположены условные обозначения аппаратуры автоматизации, размещенной на щите управления процессом (*1в, 3в, 46, 56, 5в, 5г, 5д).*

Поскольку функциональная схема автоматизации предназначена для отражения только структуры системы управления, в ней не расшифровываются технические средства, использованные в конкретной схеме. Поэтому, например, в АСР температуры воды датчиком температуры *(5а)* может быть термопара или термометр сопротивления. Тогда следующим преобразователем *(56)* в первом случае будет нормирующий преобразователь ЭДС в ток (типа НП-ТЛ-1М), а во втором — электрического сопротивления в ток (типа НП-ТС-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 *(46)* 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 к средствам регулирования, сигнализации и т.п.

Расшифровка элементов автоматизации, изображенной на функциональной схеме, дается 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.

3.8.2. Автоматическое регулирование расхода

Необходимость регулирования расхода возникает при

автоматизации большинства СВВ. АСР расхода, предназначенные для стабилизации возмущений по материальным потокам, являются неотъемлемой частью разомкнутых систем автоматизации. Часто эти АСР используют как внутренние контуры в каскадных системах регулирования других параметров. Для обеспечения заданного состава смесей или для поддержания материального и теплового балансов в аппаратах и сооружениях применяют системы регулирования соотношения расходов нескольких веществ в одноконтурных или каскадных АСР.

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 или случайными колебаниями расхода при дросселировании потока через сужающие устройства.

Принципиальная схема объекта при регулировании расхода показана на рис. 3.21, где G_1 — расход вещества через клапан, G_2 — расход вещества через расходомер. Обычно таким объектом является участок трубопровода между точкой измерения расхода (например, местом установки сужающего устройства) и регулирующим клапаном. Длина этого участка L 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 регулировании 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.

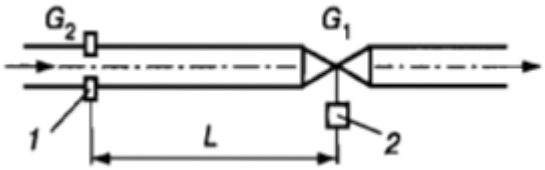


Рис. 3.21. Принципиальная схема объекта при регулировании расхода: 1 — измеритель расхода; 2 — регулирующий клапан; G_1 — расход вещества через клапан; G_2 — то же через расходомер

Регулирование расхода после центробежного насоса осуществляется регулирующим клапаном, устанавливаемым на нагнетательном трубопроводе (рис. 3.22, 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. 3.22, б).

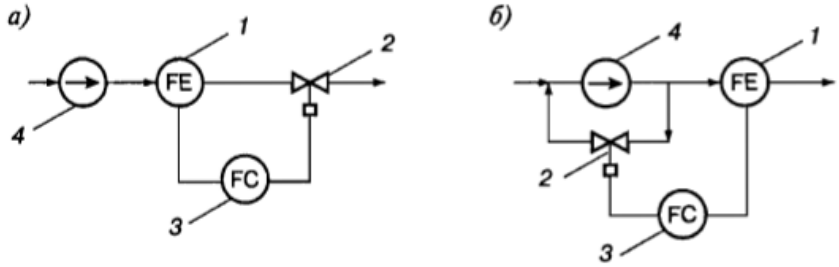


Рис. 3.22. Схема регулирования расхода после центробежного (а) и поршневого (б) насосов: 1 — измеритель расхода; 2 — регулирующий клапан; 3 — регулятор расхода; 4 — насос

В ряде случаев необходимо поддержание заданного соотношения расходов (например, «топливо—воздух»). Наиболее часто прибегают к регулированию соотношения двух веществ, которое осуществляется по одной из трех схем, описанных ниже. По первой схеме (рис. 3.23, 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 $\propto G_1$,. Иногда вместо регулятора соотношения используются реле соотношения и обычный регулятор для одной переменной (рис. 3.23, б). В этом случае выходной сигнал реле соотношения, устанавливающего заданный коэффициент соотношения а, подается в виде задания регулятору, обеспечивающему поддержание «ведомого» расхода.

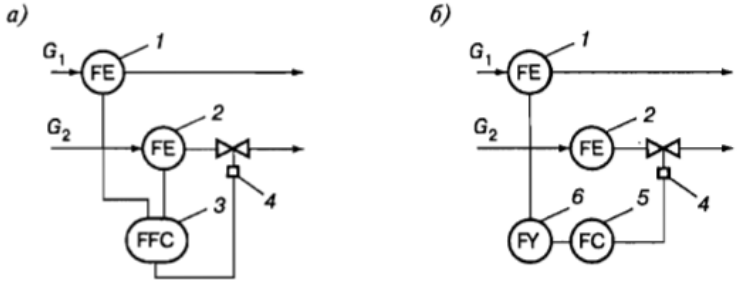


Рис. 3.23. Схема регулирования соотношения расходов при незаданной общей нагрузке:
1,2 — измерители расходов; 3,6— регуляторы соотношения; 4 — регулирующий клапан; 5 — регулятор расхода

Вторая схема (рис. 3.24, *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 G_1 автоматически произойдет и изменение расхода G_2, причем в заданном соотношении с G_1.

Третья схема (рис. 3.24, *б)* применяется в тех случаях, когда АСР соотношения расходов является внутренним контуром в каскадной системе регулирования третьего технологического параметра *Y*. При этом заданный коэффициент соотношения устанавливается внешним регулятором в зависимости от этого параметра так, что $G_2 = \propto (Y)G_1$. Особенность настройки каскадных АСР состоит в том, что на задание внутреннему регулятору устанавливают ограничение $X_{рн} < X_р <$ **$X_{рв}$.** Для АСР соотношения расходов это соответствует ограничению $\alpha_н \leq \alpha \leq \alpha_в$. Если выходной сигнал внешнего регулятора выходит за пределы $(X_{р\,н}, X_{рв})$, то задание регулятору остается на предельно допустимом значении α.

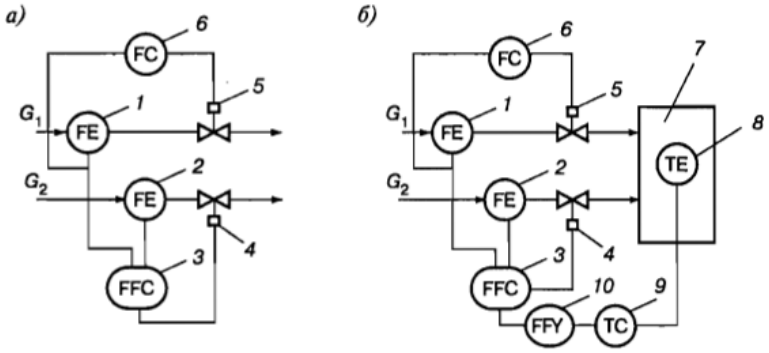


Рис. 3.24. Схема регулирования соотношения расходов при заданной общей нагрузке (в) и коррекции коэффициента соотношения по третьему параметру (б): 1,2 — измерители расходов; 3 — регулятор соотношения; 4,5 — регулирующие клапаны; 6 — регулятор расхода; 7 — технологический аппарат; 8 — измеритель температуры; 9 — регулятор температуры; 10- устройство ограничения

3.8.3. Автоматическое регулирование уровня

Уровень, как известно, 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 (сборники, смесители, промежуточные емкости, жидкофазные сооружения) не происходит никаких фазовых превращений, приток равен расходу жидкости, подаваемой в аппарат, а сток — расходу жидкости, отводимой из аппарата. В более сложных технологических процессах, сопровождающихся изменением фазового состояния веществ, уровень является характеристикой не только гидравлических, но и тепловых и массообменных процессов, а приток и сток учитывают фазовые превращения веществ (испарение, конденсацию и др.).

В зависимости от требуемой точности поддержания применяют либо позиционное, либо непрерывное регулирование уровня.

Позиционное регулирование применяется в случаях, когда уровень в аппарате требуется поддерживать в заданных, но достаточно широких пределах: $L_H < L < L_B$. Такие системы регулирования чаще всего устанавливают на сборнике жидкости или на промежуточных емкостях (рис. 3.25). При достижении предельного значения уровня в них обычно предусматривается автоматическое переключение потока жидкости на запасную емкость.

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 ПИ-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.

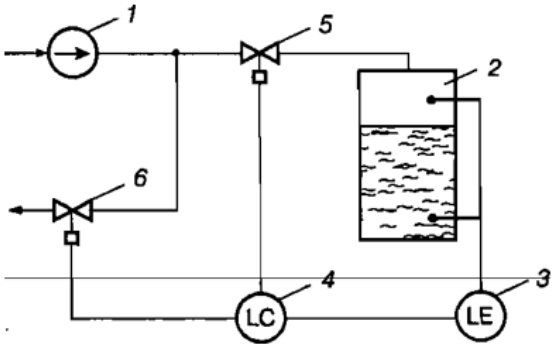


Рис. 3.25. Схема позиционного регулирования уровня: 1 — насос; 2 — емкость (аппарат); 3 — сигнализатор уровня; 4 — регулятор уровня; 5, 6— регулирующие клапаны

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. 3.26, *а)* изменением расхода жидкости на выходе из аппарата (регулирование «на стоке», рис. 3.26, *б)* регулированием соотношения расхода жидкости на входе в аппарат и выходе из него с коррекцией по уровню (каскадная АСР, рис. 3.26, *в*).

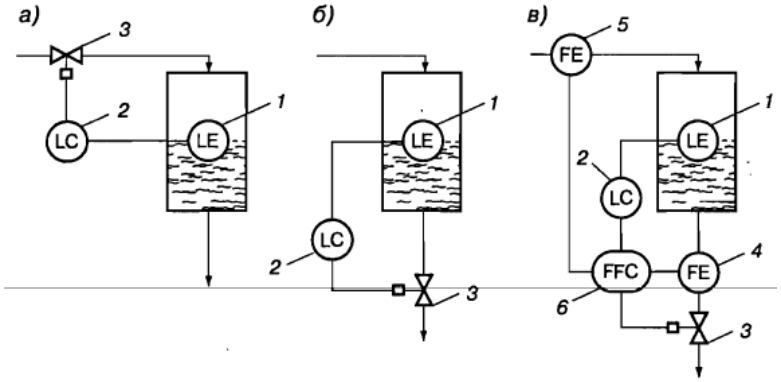


Рис. 3.26. Схемы непрерывного регулирования уровня: а — регулирование «на притоке»; б — регулирование «на стоке»; в — каскадная АСР; 1 — измеритель уровня; 2 — регулятор уровня; 3 — регулирующий клапан; 4, 5 — измерители расхода; 6 — регулятор соотношения

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 соотношения расхода жидкости на входе и выходе аппарата не будут точно равны и в зависимости от свойств объекта уровень в аппарате будет непрерывно нарастать (или убывать).

Если процессы в аппарате сопровождаются фазовыми превращениями, регулировать уровень можно изменением подачи теплоносителя. В таких аппаратах уровень взаимосвязан с другими параметрами (например, давлением), поэтому выбор способа регулирования в каждом конкретном случае должен выполняться с учетом остальных контуров регулирования.

Регулирование уровня в СВВ применяют для автоматизации водонапорных, подпиточных, расширительных, пневмогидравлических и других баков и резервуаров, а также для предупредительной и аварийной сигнализации переполнения или опорожнения различных емкостей.

Особое место в системах регулирования уровня занимают АСР в аппаратах с кипящим (псевдосжиженным) слоем сыпучих материалов. Устойчивое поддержание уровня в сушилках кипящего слоя при сушке осадков сточных вод возможно в узких пределах соотношения расхода газа и массы слоя. При значительных колебаниях расхода газа или

осадков наступает режим уноса слоя или его оседания. Поэтому к точности регулирования уровня кипящего слоя предъявляют особенно высокие требования. В качестве регулирующих воздействий обычно используют расход осадков на входе и выходе аппарата (рис. 3.27, *а)* или расход газа (воздуха) на ожижение слоя (рис. 3.27, *6).*

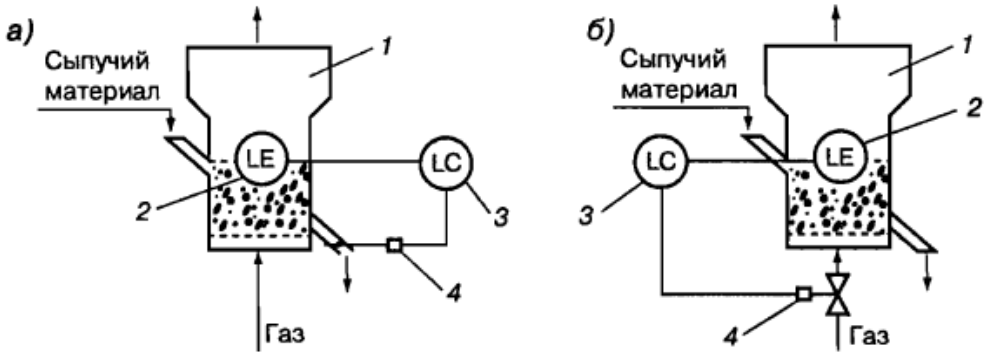


Рис. 3.27. Схемы регулирования уровня кипящего слоя: а — отводом сыпучего материала; б —- изменением расхода газа; 1 — аппарат с кипящим слоем; 2 — измеритель уровня; 3 — регулятор уровня; 4 — регулирующий орган

3.8.4. 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 большинстве СВВ требуется стабилизация давления. Поддержание давления обусловлено либо технологическим регламентом процесса, либо необходимостью преодоления различных гидравлических сопротивлений. При понижении давления ухудшаются режимные показатели процесса, при повышении — возникает аварийная ситуация (разгерметизация или даже разрыв аппарата).

Регулирование давления обычно осуществляют изменением расхода вещества через аппарат на стороне подачи или потребления. Это достигается с помощью регулирующего органа, изменяющего гидравлическое сопротивление в линии подачи или потребления. На рис. 3.28 показана схема АСР давления в аппарате, которая состоит из первичного преобразователя *1а* (манометр), совмещенного с промежуточным преобразователем, измерительного прибора *16* с регулятором и регулирующего клапана с исполнительным механизмом *1в.* Давление в такой системе регулируют изменением степени открытия клапана.

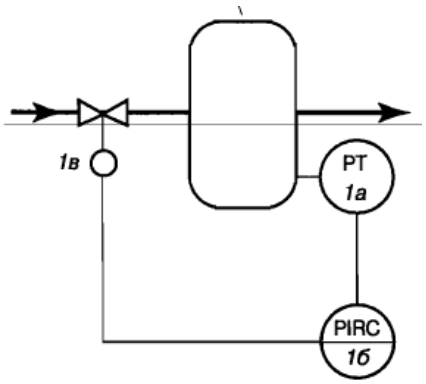


Рис. 3.28. Функциональная схема АСР

Обычно давление (или разрежение) стабилизируют в каком- либо одном аппарате, а по всей аппаратурно-технологической системе оно устанавливается в соответствии с гидравлическим сопротивлением линии и оборудования. Например, в многоступенчатой дистилляционной установке для обессоливания и опреснения воды (рис. 3.29) разрежение

стабилизируют в последнем испарителе, а в остальных оно устанавливается из условий материального и теплового балансов с учетом гидравлического сопротивления.

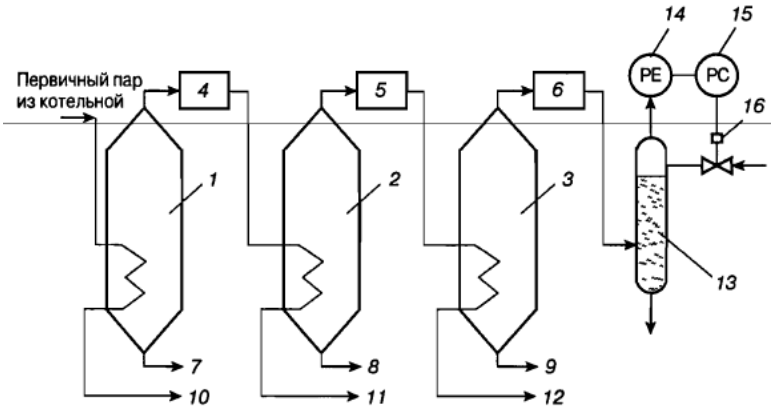


Рис. 3.29. Регулирование разряжения в многоступенчатой дистиляционной устаовке: 1-3 — испарители; 4—6 — аппараты для очистки пара; 7—9 — кубовые остатки на захоронение; 10 — первичный конденсат; 12 — очищенный конденсат; 13 — конденсатор; 14 — измеритель давления; 15 — регулятор давления; 16 — регулирующий орган

В процессах сушки осадков сточных вод в барабанных сушилках (рис. 3.30) наряду с АСР, поддерживающей заданную температуру теплоносителя, и АСР теплового режима сушки (на рисунке не показаны; особенности регулирования температуры будут рассмотрены ниже) всегда предусматривается также АСР, стабилизирующая давление газа перед топкой, и АСР, стабилизирующая режим по газовому тракту «топка — барабан — циклон» с помощью регулятора разрежения в топке путем изменения производительности насоса.

В СВВ регулируется также перепад давления в аппаратах, характеризующих гидродинамический режим, который существенно влияет на протекание технологического процесса. К числу таких аппаратов относятся многочисленные фильтры непрерывного и периодического действия.

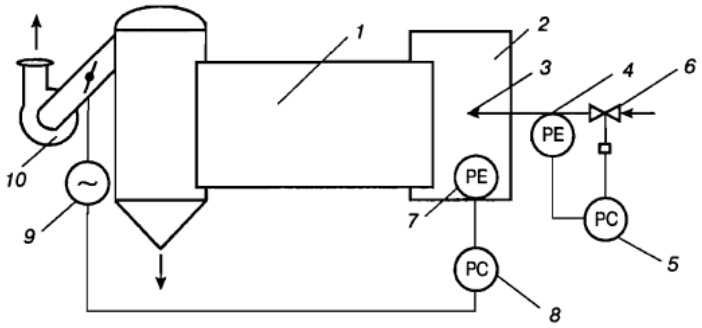


Рис. 3.30. Схема регулирования давления (разрежения) в барабанной сушилке: 1- вращающийся барабан; 2 - смесительная камера; 3 - форсунка; 4, 7- измерители давления; 5, 8 - регуляторы давления; 6 - регулирующий орган; 9 - электродвигатель; 10 – дымосос

3.8.5. 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. 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.

Рассмотрим в качестве примера характеристики наиболее распространенного в инженерных системах манометрического термометра в защитном чехле (рис. 3.31). Структурную схему такого термометра можно представить в виде последовательного соединения четырех тепловых емкостей (рис. 3.32): защитного чехла, воздушной прослойки, стенки термометра и рабочей жидкости.

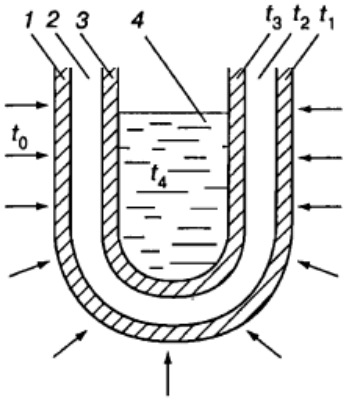


Рис. 3.31 Прннципнальная схема манометрического термометра: 1 - защитный чехол; 2 – воздушная прослойка; 3 - стенка термометра; 4 - рабочая жидкость

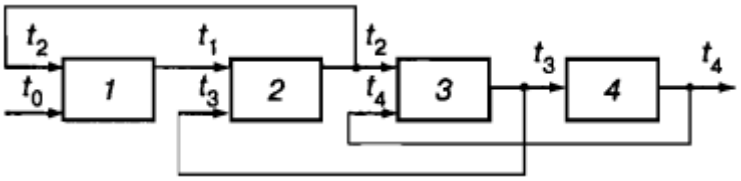


Рис. 3.32. Структурная схема манометрического термометра

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 емкости 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.

Каждая АСР температуры в СВВ создается для вполне конкретной цели 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.

Рассмотрим подробнее вопрос регулирования температуры на примере теплообменников смешения, в которых для создания необходимого теплового режима используют передачу энергии путем смешения двух материальных потоков с расходами G_1 и G_2, температурами t_1, и t_2 и удельными теплоемкостями С, и C_2 (рис. 3.33). Для регулирования температуры в таких аппаратах можно использовать несколько вариантов АСР.



Рис. 3.33. Приниципиальная схема теплообменника смешения

Вариант 1. Задача стабилизации выходной температуры смеси *t* решается применением одноконтурной замкнутой системы автоматического регулирования, в которой регулирующим воздействием является расход G_x (рис. 3.33). Использование регуляторов с интегральной составляющей в законе регулирования (ПИ- или ПИД-регулятор) гарантирует поддержание данного значения *t* в установившемся режиме, однако качество переходного процесса может оказаться неудовлетворительным при большой инерционности канала регулирования и сильных возмущениях.

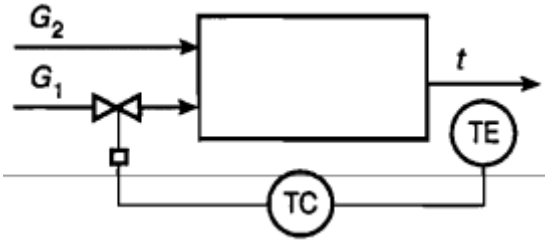


Рис. 3.34. Функциональная схема замкнутой одноконтурной АСР температуры

Вариант 2 включает систему регулирования соотношения расходов *G1* и G_2 (рис. 3.35). Это разомкнутая система автоматического регулирования способна обеспечить инвариантность регулируемой температуры смеси *t* к возмущениям по расходу G_2, однако при наличии любого другого возмущения температура не будет равна заданной.

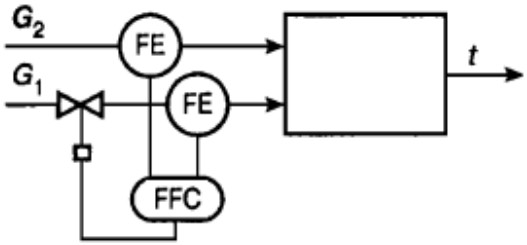


Рис. 3.35. Функциональная схема разомкнутой АСР температуры

Вариант 3 (рис. 3.36) отличается от предыдущего введением коррекции коэффициента соотношения в зависимости от значения температуры второго потока t_2, так что корректирующее устройство является компенсатором возмущения по t_2. Таким образом, данная АСР может обеспечить независимость выходной температуры *t* от двух основных возмущений — G_2 и t_2. Однако при наличии других возмущений (например, изменения теплопотерь в окружающую среду) температура будет отклоняться от заданной.

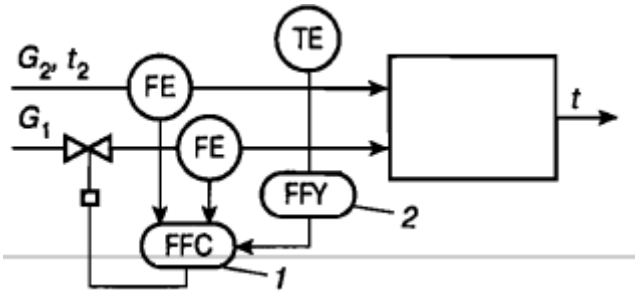


Рис. 3.36. Функциоиальная схема разомкнуrой АСР температуры с компенсацией двух возмущений: 1 - регулятор соотношения; 2- компрессор

3.8.6. Автоматическое регулирование pH

Системы регулирования pH можно разделить на два типа в зависимости от требуемой точности регулирования. Если скорость изменения величины pH невелика, а допустимые пределы ее колебаний достаточно широки, применяют позиционные АСР, поддерживающие pH в заданных пределах: $pH_н < pH < pH_в$. Ко второму типу относятся системы, обеспечивающие регулирование процессов, в которых требуется точное поддержание pH на заданном уровне (например, в процессах нейтрализации воды). Для их регулирования используют непрерывные ПИ- или ПИД- регуляторы.

Общей особенностью объектов при регулировании pH является нелинейность их статических характеристик, связанная с нелинейной зависимостью pH от расходов реагентов. На рис.3.37 показана кривая титрования, характеризующая зависимость pH от расхода реагента *G.* Для различных значений pH на этой кривой можно выделить три характерных участка I—III: первый (средний), относящийся к почти нейтральным средам, близок к линейному и характеризуется очень большим коэффициентом усиления; второй и третий участки, относящиеся к сильнощелочным или кислым средам, обладают наибольшей кривизной.

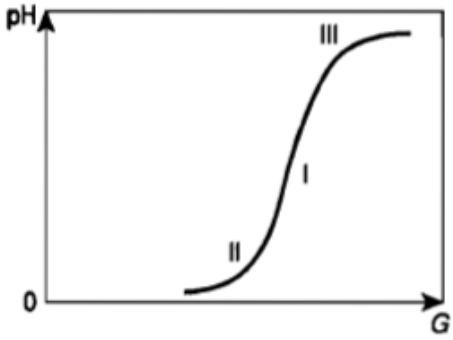


Рис. 3.37. Зависимость величины pH от расхода реагента

На первом участке объект по своей характеристике приближается к релейному элементу. Для обеспечения устойчивого регулирования применяют специальные системы. На рис. 3.38 показан пример АСР с двумя регулирующими клапанами. Клапан *1,* обладающий большим условным диаметром, служит для грубого регулирования расхода и настроен на максимальный диапазон изменения выходного сигнала регулятора *($X_{рн}$* , $X_{р\ в}$). Этому диапазону соответствует кривая *1* (рис. 3.39). Клапан *2,* служащий для точного регулирования, рассчитан на меньшую пропускную способность (кривая *2).*

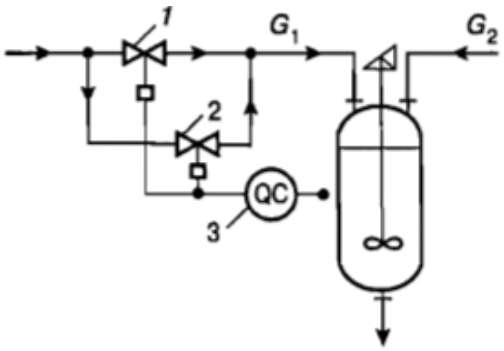


Рис. 3.38. Схема системы регулирования pH: 1,2- регулирующие клапаны; *3* - измеритель pH; 4 - регулятор pH

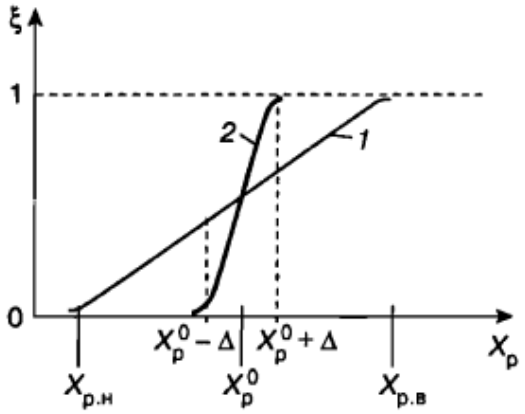


Рис. 3.39. Статистические характеристики клапанов

На втором и третьем участках характеристики (см. рис. 3.37) ее линейная аппроксимация справедлива лишь в очень узком диапазоне изменения pH, и в реальных условиях ошибка регулирования за счет линеаризации может оказаться недопустимо большой. В этом случае более точные результаты дает кусочно-линейная аппроксимация, при которой линеаризованный объект имеет переменный коэффициент усиления, а АСР должна быть дополнена еще одним регулятором. В зависимости от рассогласования А pH в работу включается один из регуляторов, настроенный на соответствующий коэффициент усиления.

3.8.7. Автоматическое регулирование параметров состава и качества

В СВВ, в частности при очистке природных и сточных вод, большую роль играет точное поддержание качественных параметров обработанной воды. Эти параметры, как уже отмечалось ранее, характеризуются высокой сложностью измерения. В ряде случаев для измерения состава используют даже хроматографический метод. При этом результат измерения бывает известен в дискретные моменты времени, отстоящие друг от друга на продолжительность цикла анализа отобранных проб. Аналогичная ситуация возникает и в том случае, когда единственным способом измерения является в той или иной степени механизированный анализ проб в лаборатории.

Дискретность измерения может привести к значительным запаздываниям и снижению точности регулирования. Чтобы уменьшить нежелательное влияние задержки измерения, используют модель связи качества с переменными, которые измеряют непрерывно. Эта модель может быть достаточно простой; коэффициенты модели уточняют, сравнивая рассчитанное по ней и найденное в результате очередного анализа значения качественного параметра. Таким образом, одним из рациональных способов регулирования качества является регулирование по вычисляемому показателю с уточнением алгоритма его расчета

по данным прямых анализов. В промежутках между измерениями показатель качества может быть рассчитан экстраполяцией ранее измеренных значений.

Блок-схема регулирования параметра качества приведена на рис. 3.40. Вычислительное устройство в общем случае непрерывно рассчитывает оценку показателя качества *x(t)* по формуле

$$x(t) = f_1[y(t)] + f_2[(t - t_1), y(t_i), y(t_{i-1}, \ldots)],$$

в которой первое слагаемое отражает зависимость x от непрерывно измеряемых переменных процесса или величин, динамически с ними связанных, а второе — от выхода экстраполирующего фильтра.

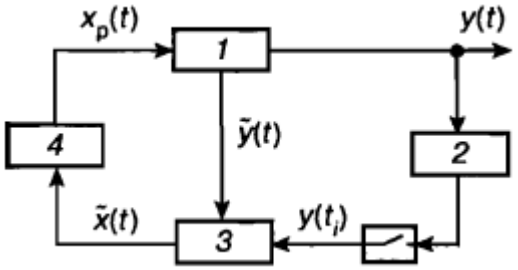


Рис. 3.40. Блок-схема АСР параметры качества: *1* — объект; *2* — анализатор качества; *3* — вычислительное устройство; *4* — регулятор

Для повышения точности регулирования параметров состава и качества применяют приборы с устройством автоматической калибровки. В этом случае система управления производит периодическую калибровку анализаторов состава, корректируя их характеристики.

3.8.8 Сигнализация, защита и блокировка

Устройства сигнализации предназначены 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 световых указателей 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 этого режима. Различают также технологическую и контрольную сигнализацию.

Технологическая сигнализация извещает о нарушении нормального хода технологического процесса, что обычно 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, сигнализируется повышение предельно 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 регламентных или о внезапном отключении какого-либо инженерного оборудования. Она 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. 3.41 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 *3К2* выключенного реле *3К* включает звонок *НА.* Включается звонок кнопкой съема звуковой сигнализации *SB1,* при нажатии которой реле *3К* через свой замыкающий контакт *3К]* становится на самоблокировку; размыкающим контактом отключается звонок.

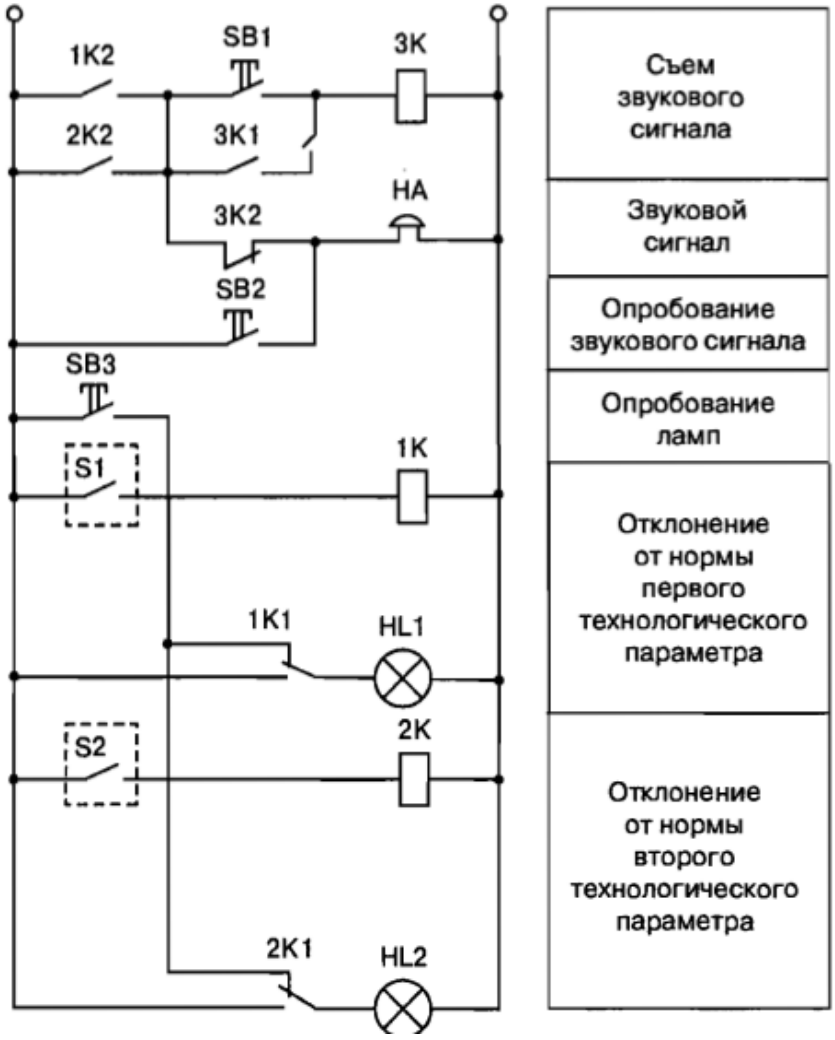


Рис. 3.41. Схема сигнализации

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. 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.

Устройства **автоматической защиты** предназначены для предотвращения 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, то 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. 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$_3$ при 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 *SBL* Защита электродвигателя от перегрузок осуществляется тепловыми реле *КК1* и *КК2*, 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. 76 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 *2КМ3* и *1КМ3* в цепи обмоток магнитных пускателей *1КМ* и *2КМ.*

При замыкании кнопкой *SB1* цепи питания магнитного пускателя *1КМ* его нормально замкнутый блок-контакт *1КМ3* 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 силовыми контактами *1КМ2* или *2КМ2.*

РАЗДЕЛ 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Темы раздела:

Методы и средства телеизмерения
Методы и схемы телеуправления и телесигнализации
Промышленные схемы телемеханики
Основные схемы автоматизации насосных станций
Автоматическое управление насосами в системах водоснабжения
Автоматическое управление насосами в системах водоотведения
Автоматизация технологических процессов в системах водоснабжения

4.1. Методы и средства телеизмерения

Особенность телеизмерения заключается в том, что измеряемая величина до ее передачи преобразуется в другую величину, удобную для передачи без искажений на расстояние. На диспетчерском пункте происходит обратное преобразование поступившего сигнала в измеряемую величину. Поэтому отличие одного метода телеизмерения от другого состоит в сущности в способе преобразования сигналов при их передаче.

Для передачи сигналов на небольшие расстояния в системах ближнего действия применяется метод интенсивности, по которому измеряемая величина передается путем изменения интенсивности тока или напряжения в канале связи. Для снижения потерь энергии в линии передача сигналов производится при малых значениях силы тока и напряжения. Передачу целесообразнее вести на постоянном токе, поскольку при этом такие параметры линии, как индуктивность и емкость проводов, не сказываются на уровне сигнала.

В системах дальнего действия применяют методы импульсной и частотной передачи сигнала, в которых измеряемая величина преобразуется в импульсы постоянного тока либо в переменный ток меняющейся частоты, в результате чего изменения сигнала, возникающие в канале связи, не вносят искажений в величину измеряемого параметра.

Увеличения количества передаваемых сигналов электрического тока добиваются применением различных способов их модуляции (амплитудной, частотной, временной и числовой). При выборе конкретного способа модуляции учитывают сложность преобразования сигнала и условия его передачи на расстояние. Чаще других используют две схемы телеизмерения.

Первая из них — **телеизмерительная схема интенсивности тока** ближнего действия с реостатным датчиком Д основана на использовании перемещения ползунка ПИ-реостата *R* измерительным прибором одновременно со стрелкой на угол ан. Изменения тока в линии связи, пропорциональные измеряемой величине, фиксируются вторичным прибором *ВП*. Для уменьшения влияния изменения сопротивления линии связи включается балластное сопротивление Rб, значительно превышающее сопротивление проводов. Поскольку для передвижения ползунка реостата необходимо большое усилие, данная схема чаще всего применяется при телеизмерении расходов, давления и уровня. Это связано с тем, что измерительные приборы, контролирующие перечисленные параметры, развивают значительные вращающие моменты.

Вторая схема время-импульсного телеизмерения (рис. 4.1) дальнего действия основана на посыле сигналов в виде импульсов определенной продолжительности или на использовании пауз разной продолжительности между двумя импульсами. В этой схеме передающее устройство *ПУ* представляет собой синхронный двигатель *1,* на вал *2* которого насажены два медных полукольца *3,* изолированных от вала и друг от друга. К полукольцам прикасаются две металлические или графитовые щетки, одна из которых *4* неподвижна, а другая *5* имеет кинематическую связь с измерительным прибором *ИЭ.* К щеткам линии связи *ЛС*

подключено реле *Р* приемного устройства УП, использующего миллиамперметр *ПП* магнитоэлектрической системы.

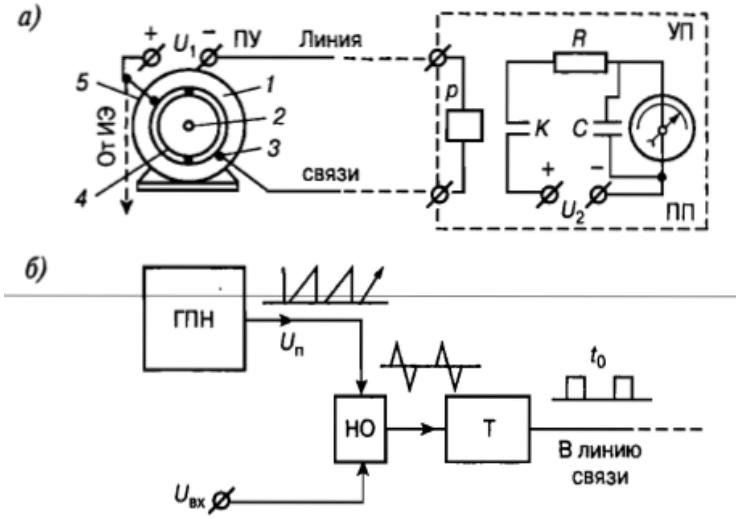


Рис. 4.1. Время-импульсиая схема телеизмерения:
а - разрез электрической схемы; б - схема реле приемного устройства

В процессе работы синхронный двигатель непрерывно вращается с постоянной скоростью. Когда щетка 5 находится в одной плоскости со щеткой *4* (как показано на рис. 4.1), вращающиеся полукольца *3* не могут замкнуть цепь питания линии связи от сети с напряжением U_u т.е. линия связи обесточена. С отклонением измеряемого параметра щетка 5 перемещается по полукольцу *3* к щетке *4*. В связи с этим в линию связи посылаются импульсы продолжительностью, пропорциональной степени перемещения щетки 5 или величине параметра.

Реле приемного устройства при замыкании своих контактов посылает к прибору импульсы напряжением U_2 такой же продолжительности, как и импульсы в линии связи. Шкала прибора, измеряющего среднее значение импульсов тока, градуируется в единицах измеряемой величины. Сопротивление *R* приемного устройства ограничивает ток в цепи прибора, а конденсатор С выполняет роль фильтра.

4.2. Методы и схемы телеуправления и телесигнализации

Управление любыми протяженными объектами практически невозможно без контроля их состояния, в связи с чем функции телеуправления и телесигнализации в СВВ осуществляются общими средствами телемеханики. Принятые при этом схемы отличаются в основном методом избирания в приеме и расшифровке сигналов, которые передаются параллельно и последовательно во времени. Первый способ связан с качественным и комбинационным методами избирания, второй — с распределительным и комбинационно-распределительным.

В зависимости от методов избирания различают **многопроводные** и **малопроводные схемы,** которые по виду раздельной передачи сигналов и устройству линий связи делят на три группы.

Многопроводные схемы с разделением сигналов (рис. 4.2, *а)* обычно применяют при сравнительно небольших расстояниях между диспетчерским пунктом и объектом управления. При наличии n-го количества самостоятельных проводов (не считая провод питания) по такой линии связи можно передать сигналы:

$$N=k*n \qquad (4.1)$$

где *К* — число импульсных признаков; обычно *К*= 2—4.

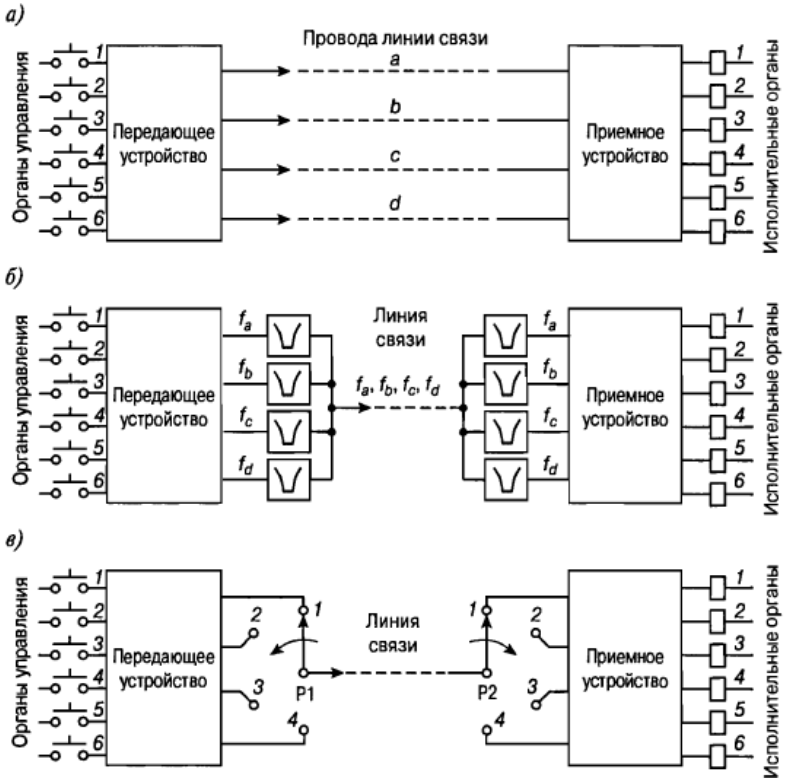


Рис. 4.2. Принципиальная схема устройств телеуправления

Таким образом, в многопроводных схемах для каждого импульса имеется отдельный канал (провод), и поэтому все импульсы могут передаваться одновременно. Для разделения импульсов управления и сигнализации применяется амплитудный признак, в соответствии с которым ток импульса управления в несколько раз превышает ток импульса сигнализации.

В малопроводных схемах с частотным разделением сигналов (рис. 4.2, б) последние передаются по одной линии связи за счет использования импульсов разной частоты f_a… f_d. В передающей

части этих систем имеется генератор синусоидальных колебаний разной частоты, а в приемной части сигналы разделяются с помощью полосовых фильтров. Для увеличения числа передаваемых сигналов часто применяют передачу каждого сигнала на двух частотах с соответствующей их комбинацией.

В малопроводных схемах с временным разделением сигналов (рис. 4.3, в) последние передаются по одной линии связи с поочередным посылом импульсов тока с помощью распределителей. В качестве распределителей Р1 и Р2 применяются переключатели, приводимые в действие электродвигателями, электромагнитные шаговые реле и катодные переключатели. Два синхронно работающих распределителя одновременно подключают линию связи к соответствующим передающему и приемному устройствам схемы.

4.3. Промышленные схемы телемеханики

Задачи контроля и управления протяженными объектами обычно решаются с помощью серийных систем телемеханики общепромышленного назначения. Для различных объектов промышленностью выпускается целый ряд унифицированных устройств телемеханики.

В практике эксплуатации СВВ хорошо зарекомендовали себя телемеханические устройства БТЦ, основанные на распределительном методе избирания. Распределитель в этих устройствах построен на феррит-транзисторных элементах, состоящих из магнитных деталей и полупроводниковых триодов.

Полярно-амплитудное разделение сигналов положено в основу телемеханических схем управления насосными станциями артезианского водоснабжения. Телемеханические

устройства этих схем позволяют передавать с диспетчерского пункта на насосную станцию следующие команды телеуправления: «Пустить насос», «Остановить насос», «Включить контактный манометр» и «Отключить контактный манометр». На диспетчерский пункт с насосной стянции передяютгя сообщения телесигнализации «Насос работает», «Насос не работает», «Произошла авария», «На станции нет электроэнергии», «На станции посторонние люди», а также сигналы двустороннего вызова телефонного разговора. С помощью электроконтактного манометра осуществляется телеизмерение давления в напорных водоводах и ряде точек водопроводной сети.

На насосной станции импульсы управления воспринимаются схемой автоматики, которая осуществляет пуск и останов насосов в заданной последовательности, защиту оборудования, включает резервное питание и резервный насос. Пуск и останов агрегата производятся автоматически по сигналу датчика или диспетчером с помощью телеуправления. Цепи автоматики и телемеханики электрически не связаны и питаются от разных источников тока.

4.4. Основные схемы автоматизации насосных станций

Насосные станции по оборудованию и протекающим в них технологическим процессам сравнительно легко поддаются автоматизации. Процессы, связанные с пуском, остановом и контролем за состоянием насосно-силового оборудования, осуществляются в строго установленной последовательности автоматически, без непосредственного участия обслуживающего персонала.

На насосных станциях автоматически выполняются следующие операции:

- пуск и останов агрегатов с выдержкой по времени как перед пуском после получения импульса управления, так и между отдельными операциями;
- включение одного или нескольких насосных агрегатов в установленной последовательности, причем включение производится либо на полное напряжение (прямой пуск), либо на пониженное с последующим включением на полное напряжение после установленной выдержки (ступенчатый пуск);
- создание и поддержание необходимого разрежения во всасывающем трубопроводе и насосе перед пуском, если он не находится под заливом;
- открытие и закрытие задвижек на трубопроводах в определенном порядке при пуске и останове насосов;
- контроль за выполнением установленного режима при пуске, работе и останове насосов, отключение работающего насоса при нарушении режима его работы и включение резервного насоса;
- передача сигналов о работе насосных агрегатов и аварийных ситуациях на диспетчерский пункт;
- защита насосных агрегатов при перегреве подшипников, вследствие работы насоса без залива, при перегрузке приводного электродвигателя ит.п.;
- отопление и вентиляция станций, их охрана от проникновения посторонних лиц, а также включение и отключение дренажных насосов.

На насосных станциях может проводиться автоматическое регулирование напора и производительности агрегатов. Оно может

осуществляться либо на входе воды в насос, либо на выходе из него путем дросселирования задвижками на трубопроводах или изменением скорости вращения насоса. Проводятся контроль за давлением воды во всасывающей и напорной линиях насосов, температурой подшипников и сальников, наличием напряжения на вводных шинах насосной станции и на шинах щита автоматического управления, а также защита насосных агрегатов от короткого замыкания, перегрузки и т.п. При появлении перечисленных недопустимых отклонений срабатывает реле защиты, выключая агрегаты из работы. Последующее включение агрегатов в работу возможно лишь после устранения неполадок.

При автоматическом управлении включение и останов насосных агрегатов осуществляется с помощью реле уровня, установленного, например, над баком водонапорного сооружения или резервуара, а также реле давления, установленного в характерных точках сети. Полученный от реле сигнал обеспечивает необходимые переключения в схемах управления и сигнализации, вследствие чего насосы включаются в определенной последовательности. Возможные варианты автоматического включения насосов и осуществления их залива перед пуском в работу показаны на рис. 4.3.

В практике работы СВВ наиболее широко применяются гидромеханические схемы, в которых автоматический пуск производится либо без предварительного (перед пуском) залива корпуса центробежного насоса, либо с предварительным заливом от напорного патрубка или с помощью вакуум-установки. Каждая из этих схем может быть реализована при открытой или закрытой напорной задвижке, т.е. существует шесть гидромеханических схем пуска насосов.

Пуск насосов с открытой напорной задвижкой наиболее легко осуществляется при следующих условиях: при малой производительности насосов, имеющих резерв мощности электропривода, достаточный для компенсации возникающей перегрузки; при работе насосов на напорные трубопроводы небольшой протяженности; при установке на напорном трубопроводе противоударных устройств. Пуск насосов с открытой задвижкой упрощает и удешевляет систему автоматического управления.

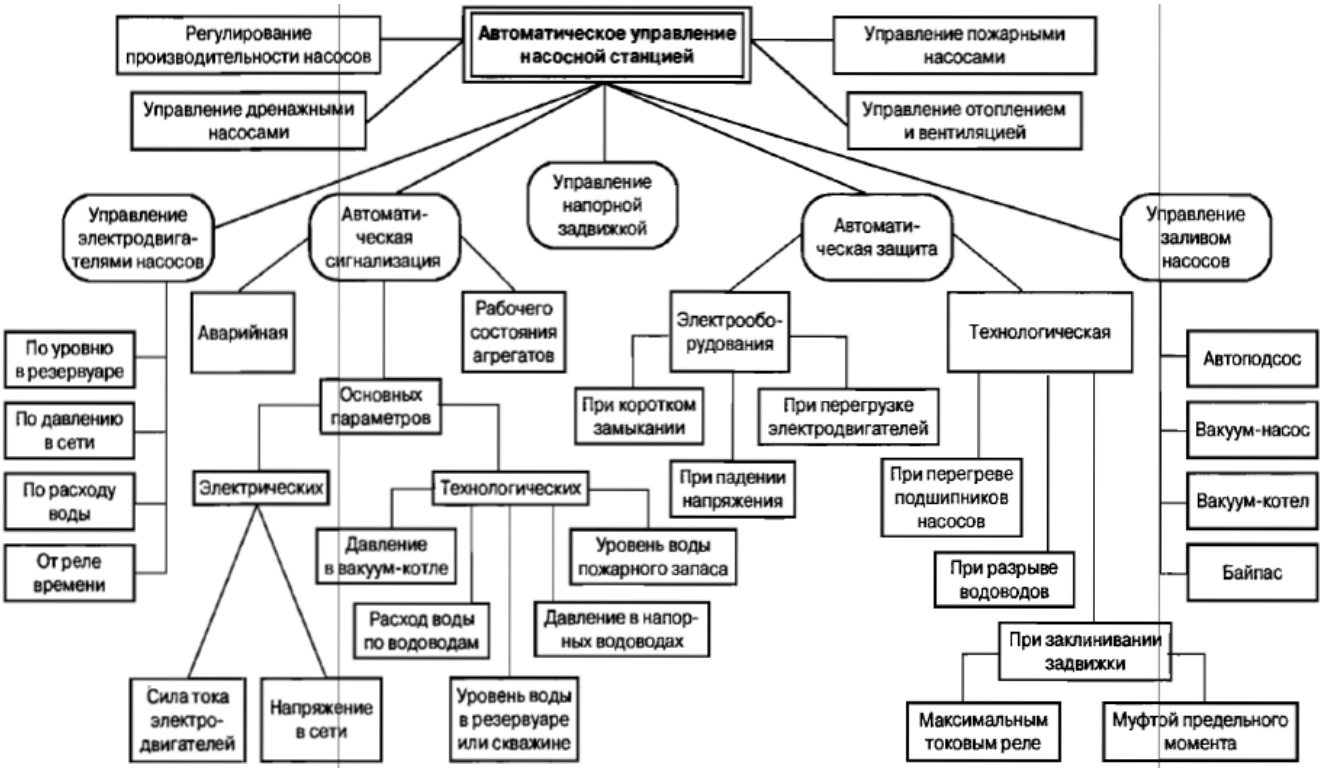


Рис. 4.3. Схема основных функций автоматики насосных станций

4.5. Автоматическое управление насосами в системах водоснабжения

Проектирование, комплектацию оборудования, монтаж и эксплуатацию насосных агрегатов в значительной мере облегчает выпуск типовых станций автоматического управления. Отечественной промышленностью освоен выпуск почти 20 модификаций унифицированных станций автоматического управления типа ПЭХ, предназначенных для автоматизации насосных агрегатов с различными электродвигателями (низко- и высоковольтными, асинхронными с короткозамкнутым ротором и синхронные с глухоподключенным возбудителем), для автоматизации артезианских насосов, вакуум-

насосов и насосов общего назначения. Для автоматизации насосных станций, состоящих из четырех агрегатов, выпускались также специальные блоки выбора очередности пуска и резервирования насосов. Станциями ПЭХ автоматизируется пуск насосов с открытой задвижкой. Релейно-контактная схема этой станции обеспечивает пуск и останов насосов, защиту и аварийное отключение как в ручном, так и в автоматическом режиме управления. В системах водоснабжения эксплуатируются также три вида станций управления насосами типа СУНО.

Станция СУНО-1 применяется для автоматизации насосных агрегатов с низковольтным электродвигателем мощностью 20—55 кВт с короткозамкнутым ротором. Эта станция обеспечивает: местное, автоматическое или телеуправление; пуск и останов залитого насоса при постоянно открытой задвижке на его напорной линии; контроль за работой насоса с помощью струйного реле, контактного манометра или реле давления; контроль за наличием напряжения в цепях управления и цепи питания электродвигателя; включение в работу насоса после кратковременного исчезновения напряжения питания (4—5 с); подачу сигнала при аварийном отключении насоса с блокировкой, предотвращающей повторный пуск насоса до ликвидации аварии.

Станция СУНО-2 применяется при автоматизации насосных агрегатов с электродвигателями мощностью 55—125 кВт. От станции СУНО-1 она отличается лишь введенным в схему управления дополнительным реле контроля залива насоса от напорного трубопровода.

Станция СУНО-3 предназначена для автоматизации насосных агрегатов с низковольтным асинхронным электродвигателем с фазовым или короткозамкнутым ротором мощностью 125—250 кВт. Эта станция обеспечивает: местное, автоматическое или телеуправление; прямой пуск электродвигателей и пуск на пониженное напряжение от сети с использованием реостата в цепи статора при постоянно замкнутых кольцах электродвигателей с фазовым ротором; пуск и останов насоса с напорной задвижкой, оборудованной электроприводом; пуск насоса с предварительным заливом от вакуумной установки; пуск электродвигателя после окончания залива насоса и его останов после полного закрытия задвижки;

контроль за нагревом подшипников, а также все операции, выполняемые станцией СУНО-1. Схема управления включает: трехполюсные контакторы Ли У, автоматический выключатель с тремя реле максимального тока с выдержкой времени 1АВ; автоматический трехполюсный выключатель с комбинированными расцепителями в пластмассовом кожухе 2АВ\ трансформатор тока ТТ, магнитные пускатели реверсивные без тепловой защиты ПМЗи ПМО\ реле времени РВ; реле максимального тока для переднего присоединения РМ; электромагнитное унифицированное реле РА; электромагнитный щитовой амперметр А; универсальный переключатель ПУ; кнопку управления КУ.

Для повышения напора в водопроводной сети микрорайонов или отдельных зданий и сооружений используются схемы автоматизации для насосных установок без регулирующей емкости типа АНУ, в которых управление производится с помощью реле давления.

За счет применения тока разной полярности, разной величины и передачи сигналов по двум каналам связи (по одной паре телефонных проводов и земле) схема позволяет передавать и принимать восемь основных и два неосновных сигнала.

В СВВ применяется также серийное время-импульсное устройство телемеханики типа УТБ, которое используют при различном расположении объектов (последовательном, радиальном) по отношению к диспетчерскому пункту.

Бесконтактная система с временным разделением сигналов типа ТМЭ позволяет обслуживать 5—40 объектов управления, 14-40 объектов сигнализации и 6—28 объектов измерения. Основными аппаратурными блоками этой системы являются распределители на магнитных элементах, которые поочередно синхронно и синфазно подключают к линии связи электрические схемы на диспетчерском пункте управления. Введенная в систему защита от исполнения ложных команд обеспечивает ее высокую надежность.

В последние годы разработаны комплекты унифицированных устройств телемеханики в малогабаритном блочно-модульном исполнении. Начался выпуск средств телемеханики на базе микропроцессоров, разработаны системы телеавтоматики с выводом оперативной информации на ЭВМ. Так, комплекс средств телеавтоматики типа КЭТ обеспечивает: телеизмерение, телеуправление и телесигнализацию с 48 контрольными пультами; дальность действия до 30 км.; вывод информации на телетайп и сопряжение с ЭВМ верхнего уровня.

4.6. Автоматическое управление насосами в системах водоотведения

Одним из основных назначений систем автоматического управления водоотводящих (канализационных) станций является поддержание в заданных пределах уровня жидкости в приемных резервуарах. Опыт эксплуатации этих систем показал, что применение для контроля уровня поплавковых реле связано с рядом недостатков (заиливанием поплавковых труб, повреждением механических связей, низкой надежностью контактных элементов).

Этих недостатков лишены электродные датчики уровня, принцип действия которых основан на электроконтактном методе измерения. Выпускается несколько вариантов этих приборов, отличающихся конструкцией и способом установки в зависимости от агрессивности измеряемой среды.

Датчик со стержневыми электродами (рис. 4.4., а) представляет собой стальную наружную защитную трубу 11 с расположенными в ней четырьмя электродами 2, изготовленными из нержавеющей стали, меди или латуни. Электроды укреплены на изоляторах 4, установленных на наружной шайбе 6 из оргстекла. Устранение касания электродов друг с другом обеспечивается двумя изоляционными шайбами Р, закрепленными винтами 10. Шайбы имеют отверстия, обеспечивающие быстрое вытекание воды из трубы датчика при опускании уровня жидкости. Защитная труба, предохраняя электроды от повреждений и прикосновения персонала, выполняет также роль нулевого электрода. Она надежно заземляется, а с нижнего торца закрывается днищем 12 с отверстиями для прохода воды. При использовании датчика для загрязненных вод на трубу надевается предохранительная металлическая сетка (на рис. 82, а не показана).

К электродам с помощью резьбовых соединений 5 присоединяют контактные провода для подключения их к аппаратуре автоматического управления. Труба сверху имеет фланец 8, который служит основанием для крышки 7, защищающей верхнюю часть электродов, и имеет с фланцем разъемное соединение с помощью винтов 3. Длину электродов определяют в зависимости от высоты контролируемых уровней, а длину трубы принимают такой, чтобы конец более длинного электрода находился на расстоянии 200 мм от днища. При длине электродов до 1,5 м достаточна одна изоляционная шайба. Конструкция датчика дает возможность регулировать длину электродов в диапазоне до 200 мм. Датчик позволяет контролировать до четырех уровней (по числу электродов). Он устанавливается на стене резервуара с помощью стальных штырей 1 или на перекрытии резервуара через трубу и имеющийся на ней фланец.

Датчик с кольцевыми электродами (рис. 4.4, б) отличается компактностью и возможностью контроля большего числа уровней. В наружную защитную трубу 8 вставлен изоляционный стержень Риз оргстекла или эбонита, закрепленный с помощью втулки 3. На стержень устанавливают бронзовые кольца 10, служащие электродами датчика, закрепленные на стержне винтами 2. Защитная труба снизу закрывается кольцом (направляющей 12), через отверстие которого проходит стержень. Сверху труба защищена крышкой 4, соединенной с фигурной втулкой 6, служащей для закрепления верхнего конца стержня. Во избежание изгиба стержня в его среднюю часть вставляется шпилька 11, предотвращающая смещение стержня с осевой линии защитной трубы, которая закрепляется двумя шплинтами 1. Крышка имеет фланец прямоугольной формы, к которому присоединяется угловой штепсельный разъем 5, подключающий провода к электродам

датчика. Для установки датчика на стенке резервуара к наружной трубе приваривают два стальных крюка 7.

Конструкция датчика позволяет устанавливать длину изоляционного стержня и наружной защитной трубы, а также число колец электродов в зависимости от конкретных условий его работы.

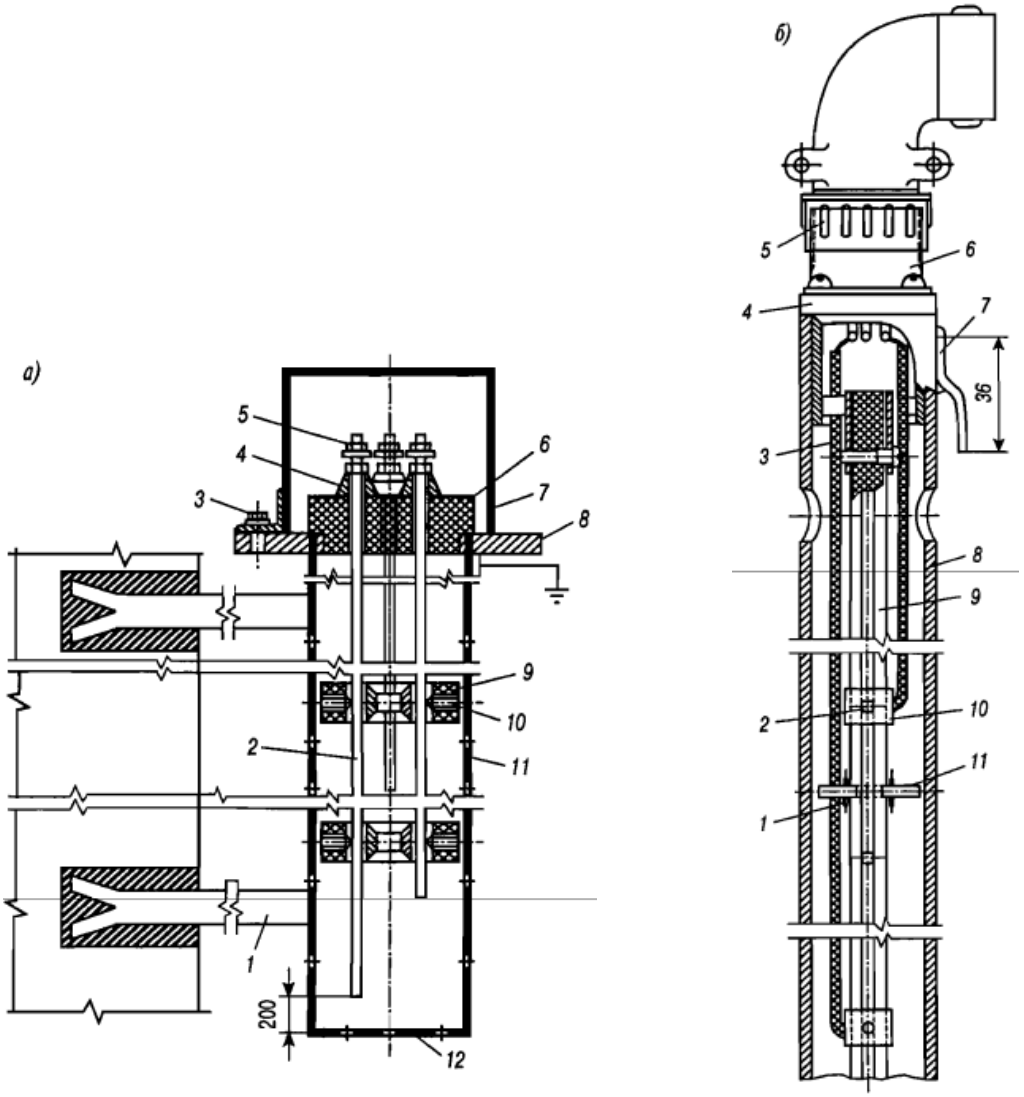


Рис. 4.4. Электродные датчики уровня: а — со стержневыми электродами; б — с кольцевыми электродами

Преимущество этого датчика состоит в том, что с увеличением числа электродов нет необходимости увеличивать диаметр наружной трубы. Для контроля любой отметки уровней жидкости электроды регулируются путем смещения колец вдоль оси изоляционного стержня до требуемой высоты уровня.

В схемах включения рассмотренных электродных сигнализаторов использование высокого напряжения («220 В) в соответствии с требованиями техники безопасности запрещено. В связи с этим применяются схемы с более низким напряжением (12-48 В), которые содержат различные усилительные устройства.

В качестве примера на рис. 4.5 приведена одна из таких схем, в которой использованы полупроводниковые триоды (транзисторы). Схема обеспечивает возможность контроля верхнего и нижнего уровней жидкости и позволяет создавать несколько вариантов схем автоматического двухпозиционного регулирования работы насосных агрегатов. Сущность работы схемы состоит в следующем: электроды соединяются с минусовым выводом источника питания и при их соприкосновении с жидкостью «открывают» предварительно

«закрытые» транзисторы, что вызывает перераспределение напряжения и срабатывание выходных реле контроля уровней. Для измерения каждого уровня требуются два транзистора, включенных по схеме с общим эмиттером.

Напряжение смещения на базу первого транзистора Тх подается через сопротивление R2 и сопротивление перехода «электрод-жидкость». Если жидкость находится ниже электрода Э, то напряжение смещения на базе транзистора Г, и коллекторный ток отсутствуют. В этом режиме нет падения напряжения на сопротивлении Щ, следовательно, «закрыт» выходной транзистор Т2. В момент касания жидкостью электрода 1Э на базе входного транзистора Т. появляется напряжение смещения. Транзистор Тх «открывается», в цепи коллектора появляется ток, на эмиттере сопротивления R3 возникает напряжение, которое «открывает» выходной транзистор Т2. Включенное в коллекторную цепь реле Р, срабатывает и производит соответствующие переключения в схеме управления насосными агрегатами. Цепи с транзисторами Тг—Т4 и реле Р2 работают аналогично и контролируют верхний уровень жидкости.

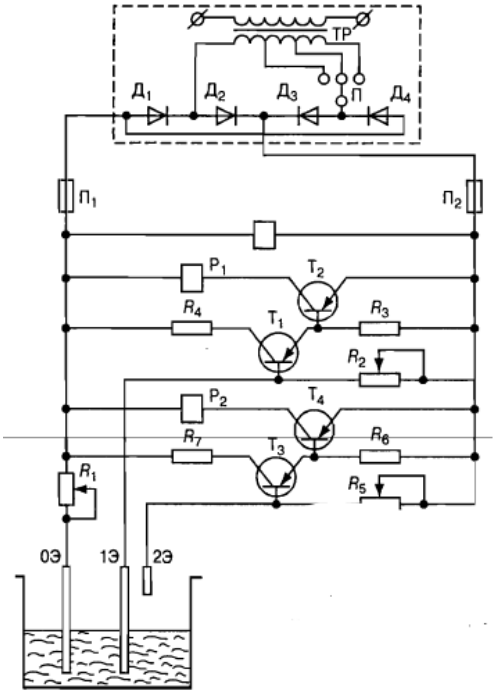


Рис. 4.5. Схема автоматического контроля жидкости с использованием «ключевого» режима работы полупроводниковых триодов

Переменным сопротивлением R, подбирается оптимальное напряжение смещения на базе транзисторов Тх и Tv которое предохраняет их от перенапряжения. Переменные сопротивления R2 И R5 дают возможность регулировать чувствительность датчика в широких пределах.

Если насосы работают с предварительным заливом, то надежность работы оборудования определяется правильным выбором датчика, контролирующего процесс залива. В этом случае о наличии электропроводных жидкостей в трубопроводах сигнализируют специальные проходные датчики, вмонтированные непосредственно в трубопровод (рис. 4.5, а). Датчик состоит из корпуса 4, штуцеров 5, накидных гаек 3 и двух приводов 2 из нержавеющей стали. Электроды закреплены внутри корпуса с помощью двух текстолитовых трубок 7.

Электрическая схема включения этого датчика (рис. 4.5, б) содержит однокаскадный усилитель с полупроводниковым триодом. Для усиления мощности транзистор Т включается по схеме с общим эмиттером, а для питания коллекторной и управляющей цепи «эмиттер—база» применяют два выпрямителя В1, и В2, собранных по схеме однофазного моста на

полупроводниковых германиевых диодах. Трансформатор Тр имеет три обмотки: одна подключается к питающей цепи переменного тока, две другие служат для питания выпрямителей. Когда жидкость не касается электрода, цепь «эмиттер—база» отключена от схемы, а переход «коллектор—база» закрыт. В коллекторной цепи с включенной в нее обмоткой реле Р проходит ток малого значения, так как цепь обладает большим обратным сопротивлением коллекторного перехода, поэтому сила тока в этой цепи недостаточна для срабатывания реле Р. При соприкосновении электрода с водой к эмиттеру подается положительный потенциал, к базе — отрицательный и переход «эмиттер—база» открывается. В результате в управляющей цепи появляется ток, усиливающий ток в коллекторе, что приводит к срабатыванию реле.

Электродные датчики, используемые для контроля залива насосов, широко применяются также для контроля наличия воды в трубопроводах при эксплуатации автоматизированных насосных станций. Схема автоматического управления насосной станцией с тремя агрегатами приведена на рис. 4.6. Пуск первого насоса происходит при подъеме уровня жидкости в приемном резервуаре до положения, соответствующего наполнению подводящего коллектора до 80%. При дальнейшем повышении уровня последовательно включаются второй и третий насосы. Их отключение происходит в обратном порядке. Пуск и отключение насосов производятся с помощью реле уровня и реле времени. При аварии и выходе из строя основного оборудования происходит автоматическое переключения подводящего коллектора на обводной с помощью включенных в схему управления задвижек и шиберов. Схема такой автоматизированной насосной станции отличается высокой надежностью и дает возможность управления без обслуживающего персонала, что позволяет снизить эксплуатационные расходы на 15% , а расход электроэнергии — на 9,3%.

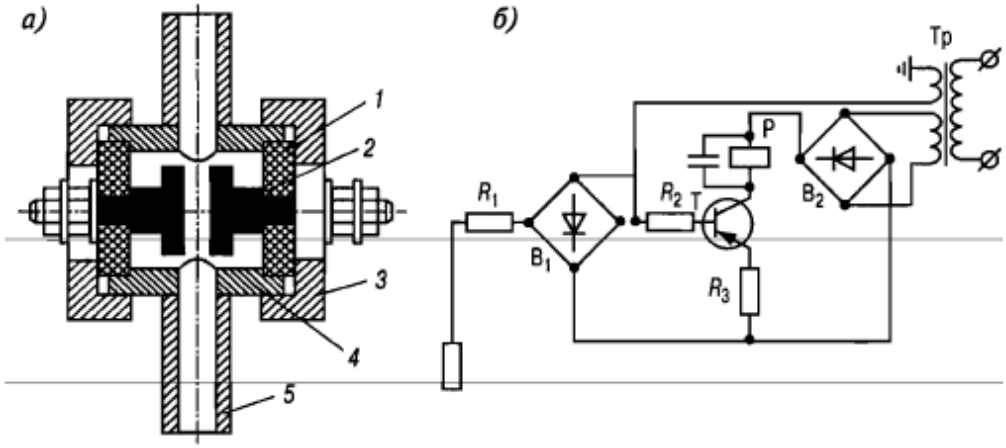


Рис. 4.6. Схема датчика контроля залива насоса: а — устройство проходного электродного датчика залива насоса; б — электрическая схема включения электродного датчика

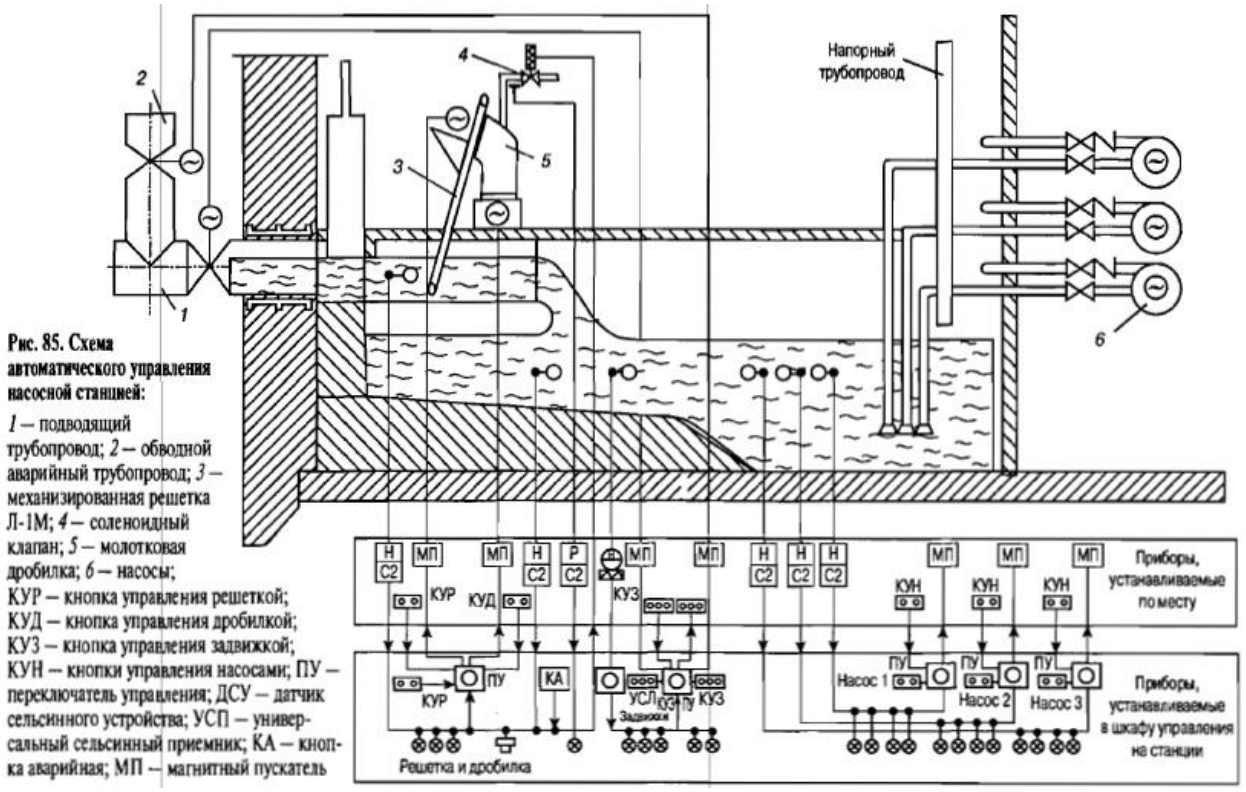


Рис. 85. Схема автоматического управления насосной станцией:

1 – подводящий трубопровод; *2* – обводной аварийный трубопровод; *3* – механизированная решетка Л-1М; *4* – соленоидный клапан; *5* – молотковая дробилка; *6* – насосы;
КУР – кнопка управления решеткой;
КУД – кнопка управления дробилкой;
КУЗ – кнопка управления задвижкой;
КУН – кнопки управления насосами; ПУ – переключатель управления; ДСУ – датчик сельсинного устройства; УСП – универсальный сельсинный приемник; КА – кнопка аварийная; МП – магнитный пускатель

Рис. 4.7. Схема автоматического управления насосной станцией

4.7. Автоматизация технологических процессов в системах водоснабжения

4.7.1. Автоматизация водоприемников

При заборе воды из поверхностных источников в водоприемных сооружениях применяются автоматические устройства для регулирования уровня воды, промывки механических (барабанных или ленточных) водоприемных сеток, управления насосами, контроля и сигнализации о работе водоприемника и уровня воды в водоеме.

Необходимость автоматического регулирования воды в водоприемнике связана с колебаниями уровня в источнике. Для этого используют щиты и затворы с гидравлическим, пневматическим или электрическим управлением. Создание схем управления шиберами и затворами не вызывает больших трудностей и выполняется на базе серийных исполнительных механизмов общепромышленного назначения. Однако в процессе эксплуатации автоматизированные шиберы и затворы нуждаются в систематическом обслуживании в связи с коррозией и влиянием отрицательных температур воздуха.

Автоматическая промывка барабанных сеток водоприемников осуществляется с помощью гидравлического привода (рис. 4.7). При засорении сеток увеличивается перепад уровней воды до и после сеток. По достижении предельного перепада поплавковый или манометрический указатель подает сигнал на передвижение сетки и промывку напорной водой ее засоренных участков. Барабан 8 с сеткой снабжен ободом 2, имеющим зубья червячной передачи. Червяк 1 посредством редуктора 4 связан с гидравлической турбиной 6. Эксцентрик 39 укрепленный на червячном валу, с помощью шатуна 5 открывает и закрывает кран 7 на трубе, подающей воду для промывки сетки.

Схема автоматической промывки ленточной вращающейся сетки приведена на рис. 87. При возрастании перепада уровней воды до и после сетки из-за засорения ее контактная система 5 дифференциального манометра 6 включает открытие задвижки 4. После поступления воды на промывку контактный манометр 3 включает двигатель 1 и приводит во вращение сетку 2. По мере отмывки сетки перепад уровней уменьшается и дифманометр 6 контактами минимального перепада закрывает задвижку 4. Известна также система

автоматической промывки сеток с использованием дифференциального реле ДРД и измерением уровней барботажным способом. Используется и периодическая автоматическая промывка сеток по установленной программе времени.

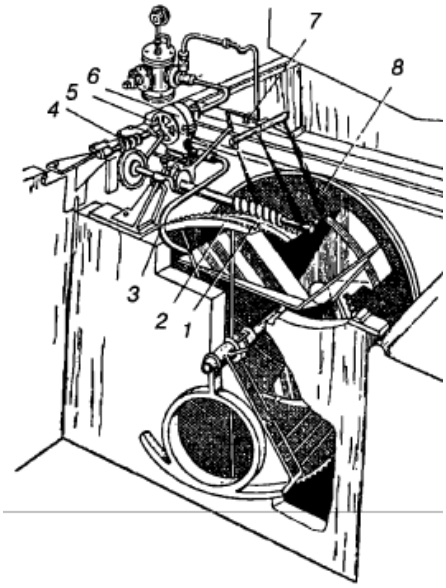


Рис. 4.8. Барабанная сетка водоприемника с автоматическим гидравлическим приводом

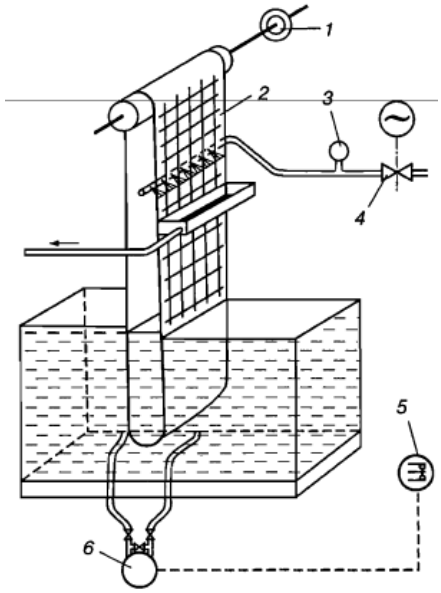


Рис. 4.8. Схема автоматизированной ленточной вращающейся сетки

Водоприемники больших систем водоснабжения оборудуют оградителями для защиты от шуги и льда, которые иногда снабжают паровыми или электрическими нагревателями. В целях экономии теплоты в них применяют автоматические шумосигнализаторы, с высокой точностью определяющие моменты включения и выключения обогрева оградителей. Работа этих приборов основана на различиях в электропроводности воды и льда (рис. 4.9).

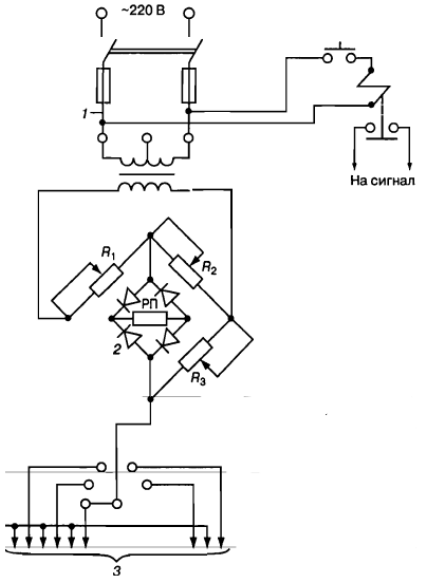


Рис. 4.9. Принципиальная схема автоматического шугосигнализатора

Сигнализатор фиксирует увеличение электрического сопротивления между электродами при появлении шуги или льда. При покрытии электродов 3 льдом сопротивление электрической цепи скачкообразно увеличивается, что нарушает баланс моста. Появляющееся при этом напряжение от трансформатора 1 в диагонали моста через

селеновый выпрямитель 2 воздействует на поляризованное реле РП, которое замыкает контакт в цепи исполнительного механизма и цепи сигнализации. В сифонных водоприемниках осуществляются автоматическое управление вакуум-насосами и контроль вакуума в вакуум-котле.

4.7.2. Автоматизация процесса коагуляции природных вод

Коагуляция является важнейшим этапом в технологии водообработки и представляет собой сложный физико-химический процесс, механизм которого до сих пор полностью не раскрыт. Процесс зависит от многих факторов: щелочности воды и величины ее pH, цветности, концентрации и температуры, степени дисперсности и природы взвешенных и коллоидных частиц, их электрического потенциала. Существенное значение имеют вид применяемого коагулянта, его химический состав и посторонние примеси. Большое число этих факторов, их нестабильность во времени и зависимость от свойств воды конкретного водоисточника, а также невозможность оперативного определения большинства из них существенно усложняют управление этим процессом. Поэтому большинство АСР этого процесса пока связаны лишь с экономным дозированием коагулянта.

Для работы в АСР дозированием растворов коагулянтов по расходу обрабатываемой воды используются регуляторы двух видов: клапаны с линейной характеристикой в непрерывном режиме работы и запорные клапаны в импульсном режиме работы (открыт — закрыт). Непрерывная подача реагента предпочтительнее импульсной как для технологии очистки воды, так и для долговечности работы привода клапана. Схема АСР непрерывного дозирования раствора коагулянта приведена на рис. 4.10. В ней используются два измерителя расходов (воды и коагулянта) и регулирующий клапан.

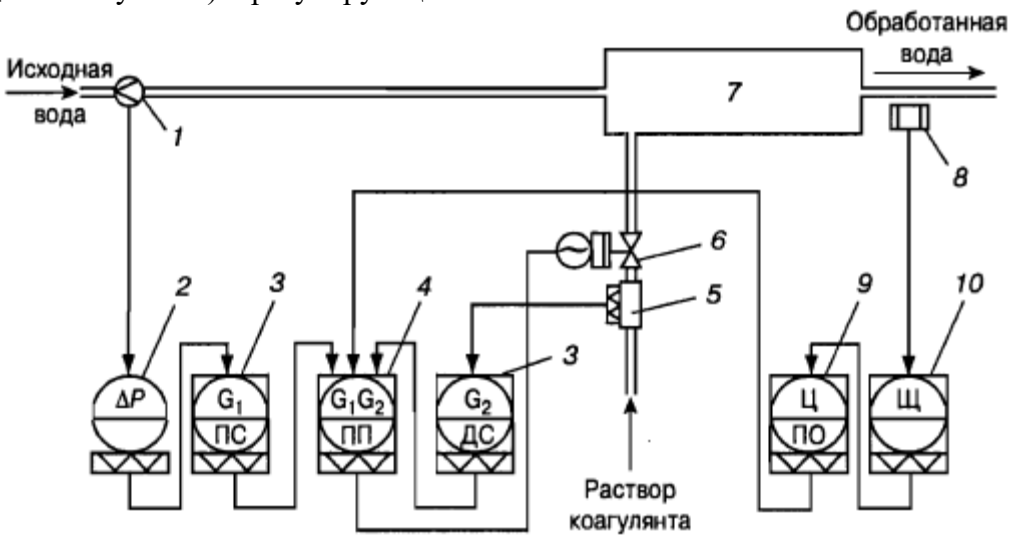


Рис. 4.10. Схема АСР подачи коагулянта с применением регулирующего клапана и двух расходомеров: 1 — смеситель; 2 — измеритель расхода воды (сужающее устройство, дифманометр, вторичный прибор); 3 — измеритель расхода раствора коагулянта (электрический ротаметр); 4 — регулирующий клапан с приводом; 5 — измеритель щелочности обработанной воды; 6 — регулятор соотношения расходов воды и коагулянта; 7 — технологический аппарат; 8 — измеритель температуры; 9 — регулятор температуры; 10— устройство ограничения

Схема АСР подачи коагулянта с применением бункерного бака-дозатора показана на рис. 4.11. Расход обрабатываемой воды в трубе измеряется с помощью сужающего устройства (сопла Вентури), дифманометра и вторичного прибора со 100%-ным вторичным задатчиком. Сигнал, пропорциональный расходу воды, с задатчика поступает на вход электронного регулятора, выход которого через реверсивный пускатель связан с электроприводом исполнительного механизма дозатора. На другой вход регулятора от

реостатного датчика исполнительного механизма поступает сигнал обратной связи. Таким образом, в этой АСР обратная связь осуществляется не непосредственно по расходу, а по положению регулирующего органа, определяющего расход. При нарушении заданного соотношения расходов сигнал рассогласования включает исполнительный механизм дозатора, который действует до тех пор, пока не восстановится прежнее положение.

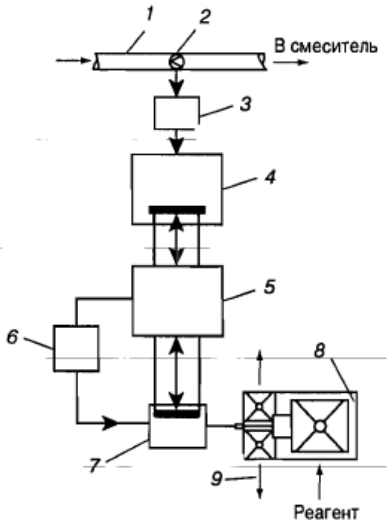


Рис. 4.11. Схема АСР подачи коагулянта с применением бака-дозатора:
1 — трубопровод обрабатываемой воды; 2 — сужающее устройство; 3 — диафрагма с индукционным датчиком; 4—вторичный прибор расходомера воды с реостатным вторичным датчиком; 5— электронный регулятор; 6 —магнитный пускатель; 7— исполнительный механизм; 8 — бак-дозатор; 9 — слив излишка реагента

Как известно, введенные в воду коагулянты изменяют электрическую проводимость воды, и это обстоятельство также используется для регулирования дозы коагулянта. Так, в кондуктометрических системах дозирования применяется разность удельных электрических проводимостей обработанной коагулянтом и исходной воды. По этому принципу построена АСР подачи коагулянта, приведенная на рис. 4.12. В ней на вход регулятора 5 подаются выходные сигналы от расходомера 4 и кондуктометра 20, снабженного трехпозиционным контактным регулятором. Связь кондуктометра с регулятором осуществляется через блок формирования пауз 16, блок управляющих импульсов 15 и промежуточный исполнительный механизм 10. Приборы 15 и 16 введены в схему из-за большого запаздывания (12—15 мин) сигнала, поступающего от кондуктомера после очередного измерения дозы коагулянта. Управляющий импульс, поступающий с блока 75, вызывает поворот вала промежуточного исполнительного механизма и соответствующее перемещение движка вторичного реостатного датчика (или плунжера индукционного датчика), включенного на вход измерительного блока регулятора 5. Выходной сигнал регулятора через магнитный пускатель 19 воздействует на электропривод 22 регулирующего клапана.

Данная АСР позволяет осуществлять как непрерывное дозирование путем дросселирования регулирующего клапана, так и импульсное — путем периодического открытия и закрытия клапана. В качестве пускового устройства при импульсном режиме работы применяют трехфазный тиристорный усилитель 27. Система дозирует коагулянт только по приращению электрической проводимости без участия расходомера воды. Положение контактного регулятора кондуктометра сигнализируется лампами 77, конечные положения регулирующего клапана — лампами 18. В качестве регулирующего органа используется мембранный клапан с электроприводом.

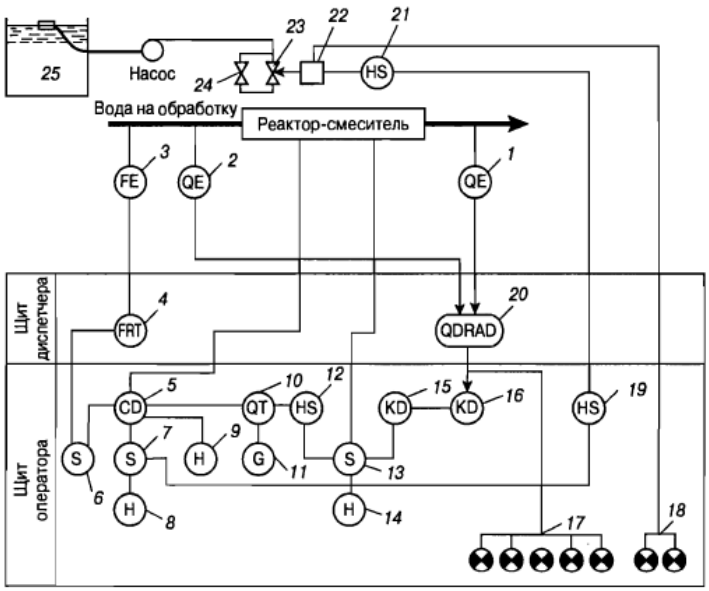


Рис. 4.12. Схема кондуктометрической комбинированной АСР дозирования коагулянта с импульсным регулирующим клапаном: 1, 2 — первичные преобразователи кондуктометрического концентратомера обработанной и исходной воды; 3,4 — расходомер воды; 5 — регулятор импульсный; 6 — ключ управления отключением воздействия расхода воды; 7— ключ управления переводом на дистанционное управление дозированием коагулянта; 8— ключ дистанционного управления дозированием коагулянта; 9 — задатчик регулятора; 10— исполнительный механизм сдатчиком обратной связи; 11 — указатель положения вала исполнительного механизма; 12, 19— пусковые реле; 13 — ключ для перевода на полуавтоматическое управление; 14— ключ полуавтоматического управления; 15 — импульсный ступенчатый прерыватель; 16 — прибор командный электропневматический; 17, 18— сигнальные лампы; 20 — концентратомер кондуктометрический; 21 — усилитель тиристорный (пускатель магнитный; 22 — электропривод клапана; 23 — клапан регулирующий); 24 — клапан на байпасе; 23 — бак коагулянта

4.7.3. Автоматизация процессов отстаивания и фильтрации воды

Несмотря на кажущуюся простоту процессов, происходящих в отстойниках, довольно трудно добиться их работы и оптимальном режиме с эффективным использованием всего объема рабочего пространства. Особенно сложно стабилизировать режим работы осветлителей со взвешенным слоем осадка, где на гидродинамику процесса накладываются колебания температуры. Такие осветлители нуждаются в автоматизации в большей сте-пени, чем отстойники.

Схема АСР гидравлической нагрузки на осветлитель, выполненная на элементах серийной системы «Каскад» (рис. 4.13), обеспечивает регулирование нагрузки, превышающей 50% номинальной, по расходу воды, подаваемой в осветлитель, и по уровню воды в сборном резервуаре. Помимо этого, система регулирует поступление в осветлитель воды от промывки фильтров. Регулятор 3 с измерительным блоком 2, получая входные сигналы от расходомера 5 и уровнемера 7, воздействует на исполнительный механизм задвижки на трубопроводе подачи исходной воды и таким образом регулирует расход воды, поступающей на осветлитель, в зависимости от уровня воды в промежуточном баке. Регулятор 6, получая сигналы от расходомеров 5 и 8, воздействует на исполнительные механизмы задвижек 4 и таким образом регулирует соотношение между расходами исходной воды и промывной воды, поступающей от механических фильтров. Расход промывной воды, поступающей на осветлитель, составляет 2—6% полного расхода. Соотношение между расходом воды на осветлитель, расходом промывной воды и уровнем в промежуточном резервуаре задается задатчиками 7.

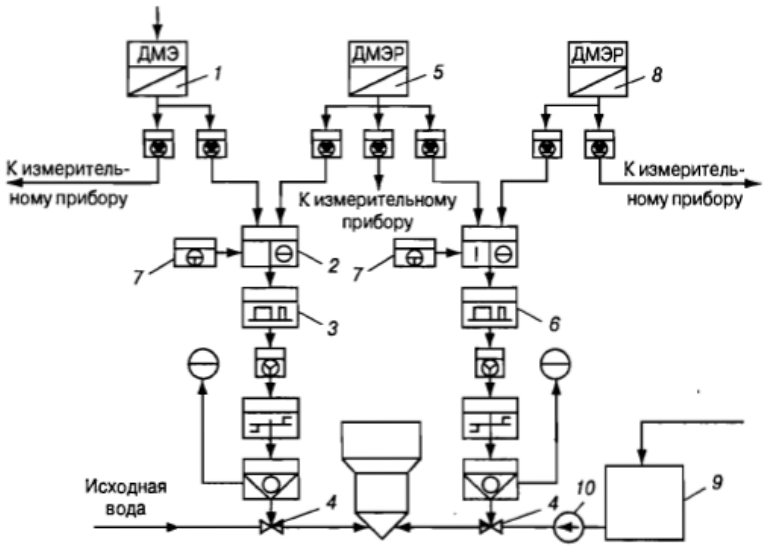


Рис. 4.13. Схема АСР производительности фильтров по уровню в резервуаре чистой воды: 1 — регулятор; 2 — дифманометр; 3 — задвижка с исполнительным механизмом; 4- фильтры; 5 — резервуар чистой воды

Для удаления из воды мелкодисперсных и коллоидных частиц, не задержанных в отстойниках и осветлителях, используют обычные скорые фильтры с инертной зернистой загрузкой (песок, гравий, дробленый антрацит). Рабочие циклы (фильтрование) периодически прерываются для восстановления фильтрующей способности загрузки путем промывки чистой водой.

При устройстве АСР производительности фильтров и скорости фильтрования различают два способа наполнения открытых фильтров водой. По первому способу подача воды производится напуском с разрывом напорного потока. В этом случае фильтры не имеют между собой гидравлической связи: производительность и скорость фильтрования отдельного фильтра могут регулироваться по уровню воды или по потерям напора, а общая производительность фильтровального отделения регулируется графиком вывода фильтров на промывку и ремонт.

По второму способу вода на фильтр подводится под уровень воды, т.е. под небольшим напором. При таком способе увеличение сопротивления загрузки в одном из фильтров или вывод фильтра на промывку влечет за собой перераспределение воды по другим фильтрам. Скорость фильтрования регулируется по расходу воды, прошедшей через фильтр, а общая производительность — по уровню в резервуарах чистой воды (рис. 4.14.). По такой схеме работают все напорные фильтры. На станциях небольшой производительности применяют регуляторы скорости фильтрования прямого действия (поплавковые с дроссельной заслонкой или гидравлические).

Система управления открытыми фильтрами (рис. 4.14) состоит из двух не связанных между собой подсистем — для регулирования скорости фильтрования и управления промывкой фильтра.

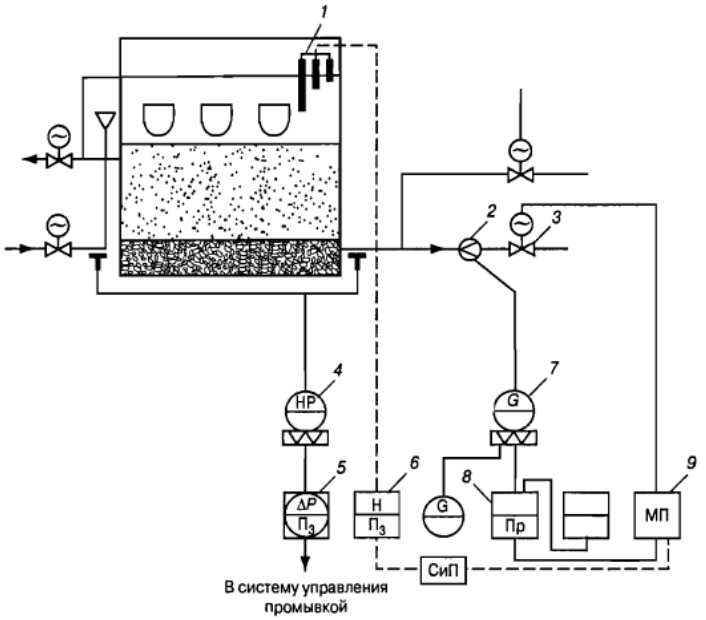


Рис. 4.14. Схема АСР производительности фильтров по уровню воды в фильтре

Первая действует по отклонению расхода фильтрата от заданного значения и построена на базе расходомера и П-регулятора. Осветленная вода через открытую задвижку 3 отводится в резервуар чистой воды. Расход воды воспринимается сужающим устройством 2 с дифманометром 7, электрический сигнал с которого поступает в регулятор 8, управляющий приводом задвижки с помощью магнитного пускателя 9. Задвижка открывается до тех пор, пока уменьшение ее сопротивления не скомпенсирует прирост потерь в зернистой загрузке. Перепад напора в фильтре измеряется дифманометром 4 и вторичным прибором 5 с позиционным регулятором, по сигналу которого приводится в действие подсистема управления промывкой.

Когда наполнение фильтра производится не под уровень воды и между фильтрами нет гидравлической связи, регулирование скорости фильтрования производится по уровню с помощью электродного датчика 1, регулятора 6 и магнитного пускателя 9 привода задвижки 3.

Схема АСР производительности фильтра с автоматический задатчиком реализует зависимость скорости фильтрования от уровня в открытом подводящем коллекторе. Система применяется только в тех случаях, когда между фильтрами имеется гидравлическая связь. Восстановление фильтрующей способности фильтра связано с рядом операций, производимых в определенной последовательности с заданной продолжительностью: отключение фильтра от общей магистрали (0,5—1 мин); включение промывных насосов (напорного резервуара) и воздуходувок и водовоздушное взрыхление загрузки (3—5 мин); отключение воздуходувок (процесс промывки 5—10 мин); спуск первого фильтрата после промывки (3-5 мин); включение фильтра в рабочий цикл (1-2 мин).

Выполнение перечисленных операций связано с открытием и закрытием пяти-шести задвижек на каждом фильтре, включением и отключением насосов и воздуходувок. При большом числе фильтров выполнение этих операций возможно только при дистанционном или автоматическом управлении. Задача автоматизации фильтров заключается не только в оперативном и надежном управлении переключательными операциями, но и в том, чтобы добиться максимальной продолжительности фильтроцикла с наименьшими затратами воды.

4.7.4. Автоматизация процессов обеззараживания

Наиболее распространенный способ обеззараживания воды на водопроводных станциях — обработка хлором. Газообразный хлор хорошо растворяется в воде, однако непосредственно из баллонов не может вводиться в воду по условиям техники безопасности.

Для введения газообразного хлора в воду служат хлораторы — аппараты, предназначенные для снижения давления и дозирования хлора. Схема одного из них (модель С-0378, рис. 4.15) состоит из технологического блока А (дозатора) и блока управления Б. Принцип работы блока дозирования следующий. Хлоргаз, проходя запорный вентиль и фильтр, поступает в регулятор давления, где оно понижается до 1,5 ±0,05 кгс/см^2 (0,15 МПа) и остается таким в качестве рабочего. Давление задается нажимной пружиной регулятора с помощью регулирующего винта.

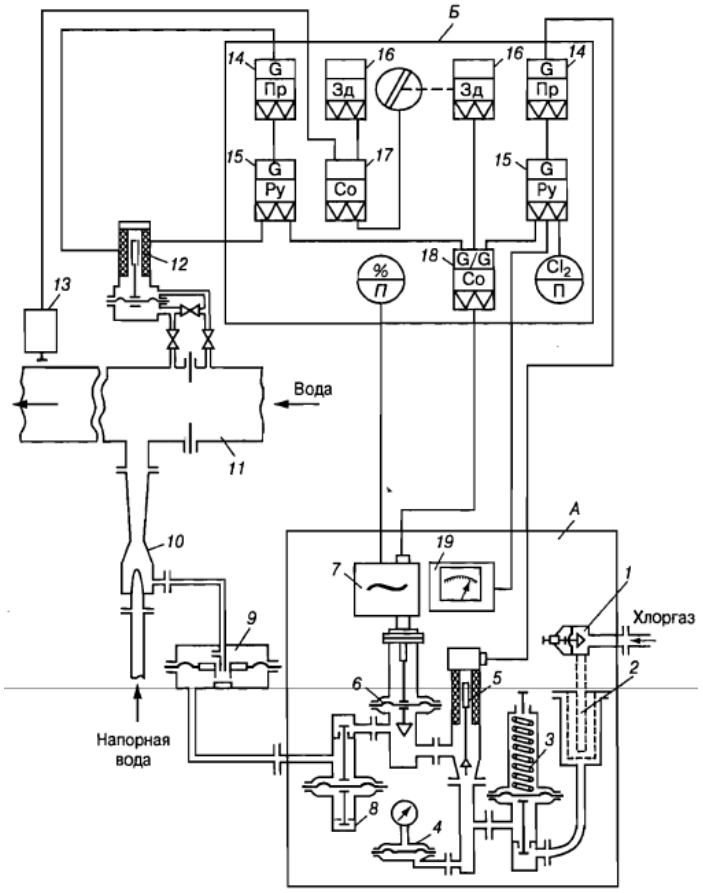


Рис. 4.15. Схема автоматического хлоратора:
1 — запорный вентиль; 2 — фильтр; 3 — регулятор давления; 4 — манометр; 5 — ротаметр; 6 — регулирующий вентиль; 7 — электропривод; 8 — вакуумный клапан; 9 — обратный клапан; 10— эжектор; 11 — сужающее устройство расходомера; 12 — дифманометр; 13 — датчик анализатора хлора; 14 — торирующие преобразователи; 15 — распределительные устройства сигналов; 16 — задатчики хлоргаза; 17 — вторичный прибор; 18 — регулятор; 19 — миллиамперметр

Из регулятора давления газ поступает через мембранную коробку манометра в электрический ротаметр, сигнал от которого передается в блок управления Б для выработки управляющего сигнала исполнительному механизму регулирующего клапана. Управление исполнительным механизмом обеспечивается ГТИ-регулятором. Регулирование количества газа возможно и вручную с помощью маховика ручного управления приводом. На корпусе привода размещен миллиамперметр, служащий указателем положения запорного конуса вентиля.

К нижней части вентиля присоединен вакуумный клапан. При нормальном режиме работы хлоратора после вентиля должно быть разрежение не ниже 0,02 МПа, при котором клапан открыт. При падении разрежения ниже 0,02 МПа клапан перекрывает поток газа. Таким образом, вакуумный клапан пропускает газ только при заданном разрежении. Из редукционного вентиля газ, пройдя обратный клапан, попадает в эжектор. Если подача хлор-газа прерывается, обратный клапан закрывается и предотвращает попадание воды в

газопровод, а оттуда в эжектор. В эжекторе хлоргаз перемешивается с рабочей водой и направляется в обрабатываемую воду.

4.7.5. Автоматизация процессов фторирования воды

До недавнего времени на водопроводных станциях применялись системы автоматизации, в которых подача объемного количества фторсодержащего раствора производилась пропорционально расходу обрабатываемой воды без компенсации других возмущающих воздействий. Более совершенные АСР, основанные на измерении концентрации фтор-ионов в воде, компенсируют отклонения от заданной нормы фтора, вызванные всеми возмущающими воздействиями.

Схема узла дозирования фторсодержащего реагента приведена на рис. 4.16. Раствор, приготовленный в растворных баках с перемешиванием сжатым воздухом, подается на фильтр (песчаный или антрацитовый) и затем в накопительные баки, откуда через дозирующее устройство поступает в камеру смешения.

Надежность аппаратуры для измерения содержания фтора, незначительные колебания расхода обрабатываемой воды и узкий диапазон изменения других возмущений (концентрация фтора в воде и реагенте, температура воды) позволили применить одноконтурную замкнутую АСР, работающую по принципу компенсации отклонения от заданной величины регулируемого параметра pF (рис.4.17). Датчик pF установлен на выходе из камеры смешения, так как в этом створе обеспечивается хорошее перемешивание реагента с массой воды и наименьшее запаздывание регулирующего сигнала. В качестве арматуры датчика в этой АСР используется проточный датчик pH-метра, а регулирующего органа — клапан с однооборотным реверсивным двигателем.

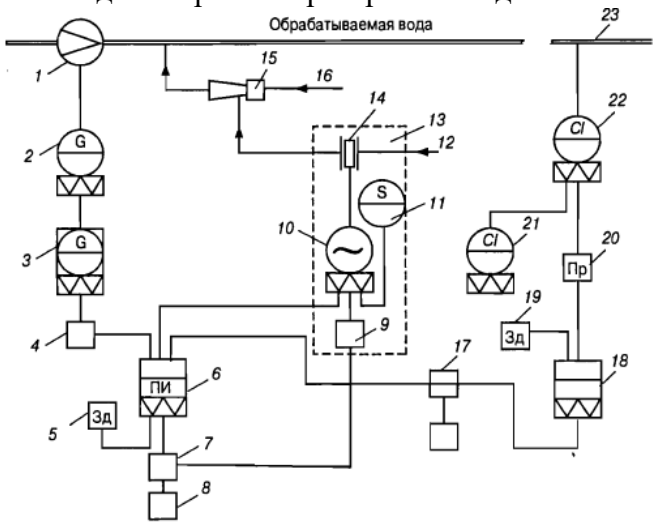


Рис. 4.16. Схема АСР хлоратора по расходу воды и остаточному хлору: 1, 2, 3 — сужающее устройство, дифманометр, вторичный прибор расходомера воды; 4 — ключ отключения воздействия по расходу воды; 5 — задатчик регулятора; 6 — регулятор с импульсным выходом; 7,8 — ключи перевода и дистанционного управления дозатором хлора; 9 — пусковое устройство; 10— однооборотный исполнительный механизм; 11 — указатель положения вала исполнительного механизма; 12 — подача хлоргаза; 13 — газогидравлический блок Дозатора хлора; 14 — регулирующий клапан дозатора; 15 — эжектор; 16 — эжектирующая вода от водопровода; 17— ключ отключения воздействия по концентрации остаточного хлора; 18 — регулятор с аналоговым выходом и памятью; 19— задатчик регулятора; 20— электропневматический командный прибор — прерыватель; 21 — вторичный прибор анализатора хлора; 22 — анализатор хлора; 23 — поток обрабатываемой воды

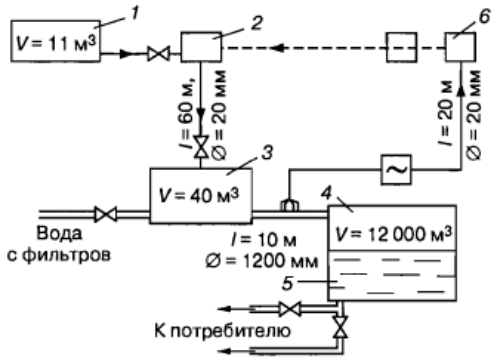


Рис. 4.17. Схема узла дозирования раствора фторреагента: 1 - бак рабочего раствора; 2 - регулирующий клапан с электроприводом; 3 - смеситель; 4 - приемная камера; 5 - резервуар чистой воды; 6 - лаборатория (отбор проб)

4.7.6 Автоматизация процессов реагентного умягчения воды

Умягчение воды относится к числу распространенных процессов обработки воды в промышленном водоснабжении. Основным методом обработки является реагентный, который при неглубоком умягчении применяется самостоятельно, а при глубоком — в сочетании с методом катионирования. При введении в воду реагентов (извести или соды) катионы кальция и магния превращаются в труднорастворимые системы, выпадающие в осадок.

Основным параметром регулирования процесса умягчения воды реагентным методом служит величина pH, при отклонении которой от заданного значения изменяется подача реагента. Схема АСР дозирования реагентов в осветлитель показана на рис. 4.. В контуре регулирования подачи извести величина pH измеряется в конце зоны смешения осветлителя в пробоотборной точке. В этой точке реакция взаимодействия реагентов с солями карбонатной жесткости проходит примерно на 80%, поэтому контрольное значение pH задается меньшим с расчетом на то, что в верхних зонах осветлителя величина pH достигнет -10,2.

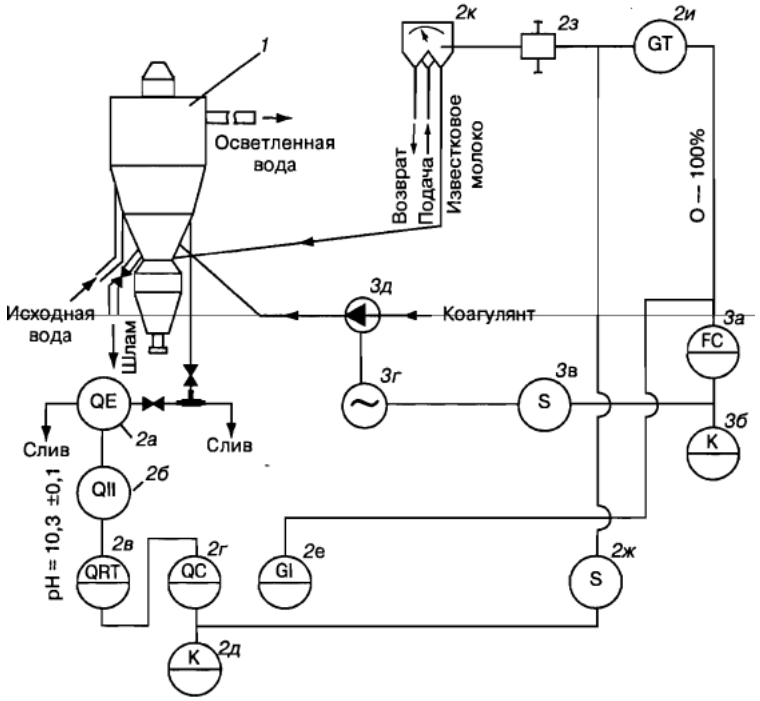


Рис. 4.18 Схема АСР процесса декарбоннзацни воды в осветлителе: 1 - осветлитель; система дозирования извести: 2а - датчик pH-метра; 26 - преобразователь; 2в - потенциометр самопишущий; 2г - регулятор изодромный; 2д - блок управления; 2е - указатель положения дозатора; 2ж - пускатель магнитный реверсивный; 2з -исполнительный механизм; 2и - датчик обратной связи; 2к - дозатор известкового молока; система дозирования коагулянта: 3а - регулятор-импульсатор; 3б - блок управления; 3в - пускатель магнитный; 3г - электродвигатель насоса; 3д - насос-дозатор; 4 -делитель потока

Система дозирования извести — это одноконтурная АСР величины pH, действующая по принципу компенсации отклонения параметра. Отклонения, вызванные изменением концентрации известкового молока, колебаниями его расхода из-за неравномерности подачи насосами и засорения трубопроводов, изменением расхода воды и ее щелочности, формируют сигнал, поступающий на вход регулятора, который через дозатор корректирует дозу извести.

Пробоотборный датчик pH-метра 2а монтируется на пробоотборной линии из осветлителя. В датчике установлены стеклянные измерительные электроды с изопотенциальной точкой, соответствующей pH 10. Это позволяет поддерживать заданное

значение pH 10,3 в месте пробоотбора без введения автоматической температурной компенсации.

Для повышения срока службы стеклянных электродов перед датчиком установлен делитель потока, который делит общий поток на две неравные части с соотношением расходов 1:3. Поток с меньшим расходом проходит через датчик pH-метра, а второй сбрасывается в лоток. Сигнал отдатчика через высокоомный преобразователь 2б подается на вторичный прибор 2в, выход которого включен на вход регулятора 2г. При отклонении pH от задан-ного значения на входе регулятора возникает напряжение небаланса. Этот сигнал через магнитный пускатель 2ж воздействует на исполнительный механизм 2з, передвигающий регулирующий орган дозатора известкового молока 2к в сторону компенсации отклонения регулируемого параметра.

Дозатор известкового молока ДИМБА устроен так, что угол поворота вала однооборотного механизма пропорционален расходу отдозированной известковой суспензии. Сигнал от датчика обратной связи исполнительного механизма дозатора поступает на регулятор-импульсатор, который через магнитный пускатель управляет приводом насоса-дозатора. Импульсный режим работы насосов-дозаторов обеспечивается настроечными параметрами регулятора и задатчика.

4.7.7 Автоматизация стабилизационной обработки воды

Стабилизационной называется обработка воды с целью регулирования в ней углекислого равновесия, при нарушении которого в одних случаях образуются карбонатные отложения на стенках труб и аппаратов, в других — происходит коррозия материалов из-за способности воды растворять карбонат кальция.

Отмеченные нарушения особенно характерны для оборотных охлаждающих систем водоснабжения, в которых для предотвращения карбонатных отложений применяют подкисление воды. Кислоту вводят в добавочную воду во всасывающие линии циркуляционных насосов. Дозирование кислоты является весьма ответственной операцией, поскольку превышение дозы приводит к коррозии, а недостаток — к выпадению карбоната кальция.

Упрощенные АСР процесса подкисления оборотной воды обычно строятся по величине pH, которая корректируется в процессе эксплуатации системы по данным аналитических методов. Воздействие реагентов на массу циркулирующей воды является инерционным и обычно занимает несколько часов. Это означает, что сигнал от pH-метра поступает на регулятор дозатора с большим запаздыванием. Более высокими динамическими свойствами обладают АСР подачи реагента при его введении в добавочную воду, количество которой составляет 5—10% всего объема циркулирующей воды. При таком способе регулирования массообмен между кислотой и водой происходит за более короткое время.

В этом случае регулирующее значение pH определяется расчетом и корректируется по показаниям второго, корректирующего pH-метра, который устанавливается на горячей воде, как и в первом варианте АСР. Очевидно, более совершенной АСР будет система, построенная с применением карбонатного поглотителя. АСР подачи кислоты дополняется системой контроля параметров, характеризующих состояние охлаждающей воды. Ее основу составляют расходомеры циркуляционной и добавочной воды, измерители температуры воды, охлажденной в градирнях и нагретой в теплообменнике, и атмосферного воздуха.

РАЗДЕЛ 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Темы разделов:

Автоматизация процессов механической очистки сточных вод
Автоматизация процессов физико-химической очистки сточных вод
Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод
Автоматизация процесса сбраживания осадков сточных вод
Автоматизация процесса механического обезвоживания осадков

5.1. Автоматизация процессов механической очистки сточных вод

К механическим процессам очистки на современных очистных станциях относят процеживание воды через решетки, пескоулавливание и отстаивание. При автоматизации этих процессов осуществляется автоматическое управление электродвигателями грабельных механизмов, илоскребов, насосов и шиберов.

При автоматизации решеток основная задача заключается в управлении граблями, дробилками, транспортерами и шиберами на подводящем канале. Автоматическое управление механизмами решеток осуществляется в зависимости от изменения перепада уровней в канале до и после решеток (рис. 5.1). В качестве прибора, измеряющего перепад уровней, принят дифманометр с электро-контактным устройством. Перепад уровней контролируется путем измерения разности давления продуваемого воздуха в двух трубках, опущенных в воду до и после решетки. При достижении заданной величины перепада контактное устройство включает в работу грабельный агрегат. Выключение грабель осуществляется также контактным устройством или с помощью реле времени через промежуток времени, выбираемый на основе эксплуатационного опыта.

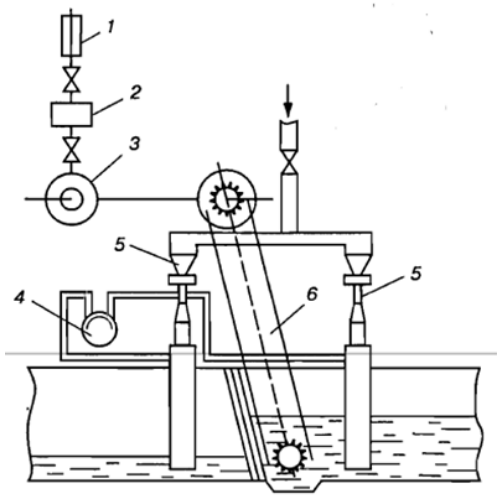


Рис. 5.1. Схема автоматического управления механическими граблями по перепаду уровней до и после решеток: 1 - предохранитель; 2 - пускатель электродвигателя; 3 - электродвигатель; 4 - дифманометр; 5 - эжекторы; 6 - механические грабли

Автоматические устройства в песколовках применяют для распределения и регулирования количества сточных вод, а также для удаления песка при достижении им предельного уровня. Регулирование нагрузки на отдельные песколовки позволяет автоматически поддерживать скорость протока воды через них в заданных пределах с помощью поплавкового уровнемера и электрифицированных шиберов. Устройство настраивается таким образом, что при общем расходе менее заданного шибер обводного

канала полностью закрыт, а при расходе, большем заданного, шибер открывается настолько, что в обводной канал сбрасывается весь избыток воды сверх расчетного расхода песколовок.

Автоматизация удаления песка из песколовок производится двумя путями. В первом случае песок удаляется по мере достижения им заданного уровня. Во втором — песок удаляется через определенные промежутки времени, которые, как и время удаления песка, принимаются на основе опыта эксплуатации.

Наибольшее распространение получил первый способ, при реализации которого используется датчик уровня песка (рис. 5.2). Основой этого прибора является термосигнализатор с навитой на его концевой части нихромовой спиралью, устанавливаемой в песколовке на глубину, равную максимальному уровню песка. При низком уровне вследствие движения воды происходит повышенная теплоотдача и спираль нагревается незначительно. При подъеме уровня до спирали ее нагрев резко возрастает, что вызывает замыкание контактов термосигнализатора, включенных в схему сигнализации или управления.

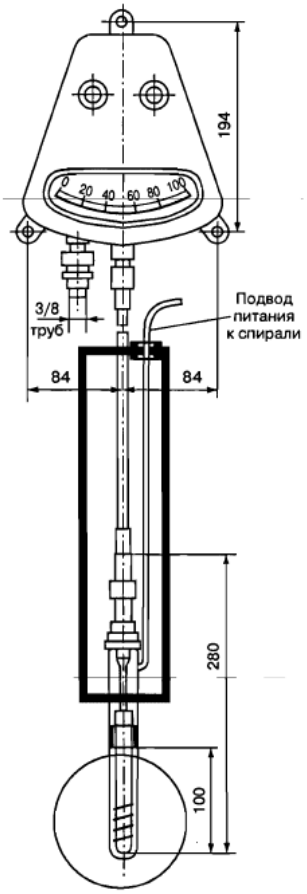


Рис. 5.2. Прибор для контроля уровня песка в песколовках

В первичных отстойниках наиболее важным является автоматизация удаления из них осадка. Простейшее решение этой задачи — выпуск осадка по заданному графику с помощью программного регулятора. Однако точный график откачки в условиях колебания притока сточных вод и количества взвешенных частиц составить очень сложно, поэтому чаще всего автоматическое удаление осадка производят путем измерения его уровня в отстойниках. В схеме измерения уровня используется фотоэлектрический датчик, состоящий из двух металлических корпусов, в одном из которых помещается фотосопротивление, а в другом — лампа подсветки. В зависимости от изменения оптической плотности жидкости между фотосопротивлением и лампой подсветки изменяется значение тока, поступающего в схему автоматики.

Для эффективной работы первичных отстойников и предотвращения выноса взвешенных веществ большое значение имеет поддержание одинаковой нагрузки на каждый отстойник или равномерное распределение между ними переменного общего притока сточных вод на станцию. С этой целью предусматривается автоматическое регулирование открытия шиберов на подводящих к каждому отстойнику каналах. Такое регулирование осуществляется с помощью расходомеров или уровнемеров воды в каналах. При большом числе отстойников на станции предусматривается также использование обегающего устройства для контроля очередности выпуска осадка.

5.2. Автоматизация процессов физико-химической очистки сточных вод

В системах очистки сточных вод физико-химическими методами наибольшее распространение получила напорная флотация. При этом способе очистки сточные воды насыщаются газом (воздухом) под избыточным давлением, которое затем быстро снижается до атмосферного. Необходимость оснащения флотационных установок средствами автоматического контроля регулирования обусловливается нестационарностью состава очищаемых сточных вод, высокой интенсивностью процесса и его повышенной чувствительностью к входным воздействиям.

На рис.5.3 показана блочная схема АСР со стабилизацией качества очищенной воды путем изменения расхода потока рециркуляции, несущего во флотатор мелкодисперсную газовую фазу. Система состоит из установленных на выходе флотационного резервуара 1, мутномера 3, измеряющего концентрацию взвешенных частиц в очищенной воде, расходомера 2, регуляторов 4 и 8 и исполнительных механизмов 5 и 7, один из которых регулирует расход циркуляционного потока, насыщаемого воздухом в напорном ресивере 5, а другой — расход сточной воды, поступающей во флотатор.

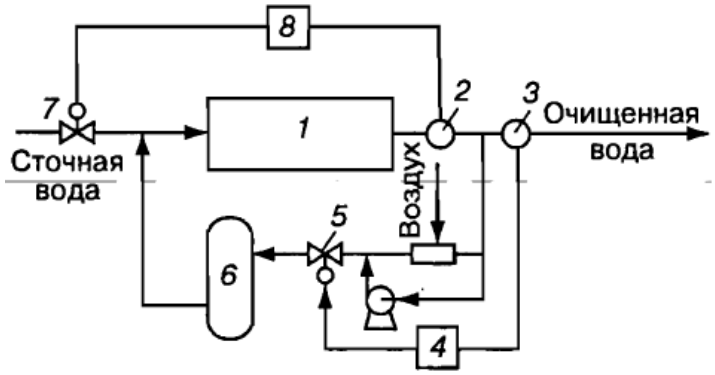


Рис. 5.3. Схема АСР процесса очистки сточных вод напорной флотацией

Сигнал, возникающий при увеличении на выходе флотатора концентрации взвеси в воде выше заданного значения, с мутномера 3 поступает на регулятор 4, который, воздействуя на исполнительный механизм 5, увеличивает расход потока рециркуляции. При увеличении расхода этого потока увеличивается количество газовой фазы, переносимой во флотатор. Новое количество газа обеспечивает уменьшение мутности очищенных стоков. Одновременно при увеличении расхода потока рециркуляции через флотационный резервуар появляется сигнал отклонения на выходе расходомера 2, который поступает на регулятор 8. Этот регулятор, воздействуя на исполнительный механизм 7, уменьшает поступление сточной воды во флотатор, обеспечивая постоянство суммарного расхода через него. При снижении концентрации взвеси производительность флотатора соответственно увеличивается. Описанная АСР позволяет сократить объемы флотаторов почти на 20% при соблюдении заданного качества очистки.

5.3. Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод

Биологический метод занимает особое место в проблеме очистки сточных вод. Он до сих пор не имеет конкурентов по универсальности, глубине очистки и эксплуатационным расходам, особенно при очистке больших масс воды.

Наиболее распространена биологическая очистка в аэротенках с помощью активного ила с аэрацией воздухом иловой смеси. Для автоматизации этого процесса разработано много различных схем регулирования, таких, например, как АСР илового режима в радиальном отстойнике по заданному уровню, АСР кислородного режима в аэротенках, АСР илового режима по концентрации возвратного ила с блокировкой по положению уровня ила в отстойнике.

Рассмотрим схему наиболее совершенной, комбинированной АСР (рис. 5.4), которая состоит их трех отдельных систем: регулирования концентрации растворенного кислорода, регулирования нагрузки на активный ил и регулирования возврата ила.

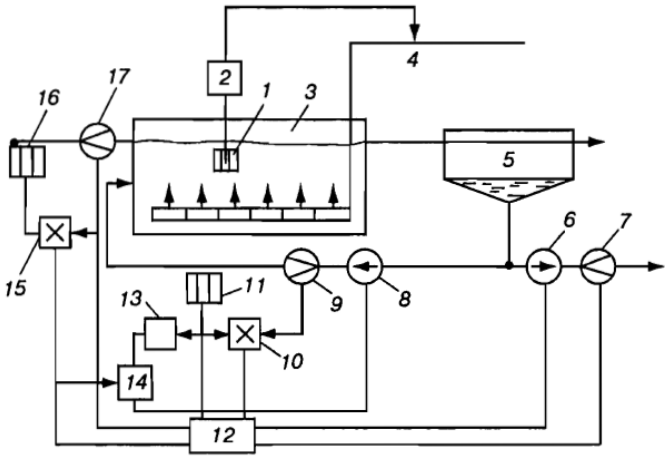


Рис. 5.4. Схема АСР процесса очистки сточных вод в аэротенке по ХПК исходной сточной воды и концентрации активного ила

В АСР концентрации растворенного кислорода регулятор 2 воздействует на заслонку 4 воздуховода аэротенка 3 для поддержания во всем объеме иловой смеси заданной концентрации, измеряемой датчиком 1.

АСР нагрузки на активный ил предназначена для поддержания постоянным соотношения между количеством загрязнений, поступающих в аэротенки, и количеством возвратного ила. Сигналы от датчиков концентрации органических загрязнений 16 и расхода сточной воды 17 поступают в блок умножения 15, после которого перемноженный сигнал подается на вход регулятора соотношения 14. В него же подаются сигналы от измерителей концентрации активного ила 11 и расхода возвратного ила 9, перемноженные в блоке умножения 10.

Заданная величина органической нагрузки для обеспечения нормального режима работы вторичных отстойников 5 корректируется по величине концентрации активного ила функциональным преобразователем 13. Регулятор соотношения воздействует на насос 8 возвратного ила.

АСР возврата ила действует таким образом, чтобы общая масса ила в аэротенках и отстойниках оставалась постоянной. Сигналы от измерителей расхода сточной воды 17 и избыточного ила 7, концентрации активного ила 11 и блоков умножения 10 и 15 поступают в вычислительное устройство 12, которое рассчитывает массу активного ила, находящегося в системе очистки, и воздействует на насос 6 избыточного ила. Предусмотрена блокировка, запрещающая сброс избыточного ила при поступлении концентрированных сточных вод.

5.4. Автоматизация процесса сбраживания осадков сточных вод

На городских станциях аэрации сбраживание осадков производится в метантенках с помощью «острого» пара. Эффективная эксплуатация этих сооружений требует обязательного применения автоматических устройств для поддержания в заданных пределах температуры сбраживания осадка и его перемешивания. Большое значение имеет также автоматизация контроля ряда параметров процесса, к которым относятся расходы сырого и сброженного осадков, уровень осадка в метантенке, давление и расход газа, pH и др.

При автоматическом управлении подогревом осадка измеритель температуры (термометр сопротивления) помещается в центре метантанка. С помощью этого датчика сигнал об изменении температуры осадка передается на вторичный прибор, содержащий электроконтактное устройство. При температуре ниже заданного значения автоматически включаются насос перемешивания осадка и задвижка на его напорной линии. Одновременно открывается электромагнитный вентиль на паропроводе и во всасывающий па-трубок насоса подается пар для подогрева осадка. Перемешивание осадка производится одновременно с его подогревом. После увеличения температуры до заданного значения электроконтактный термометр подает импульс, вызывающий отключение паропровода, остановку насоса и закрытие напорной задвижки.

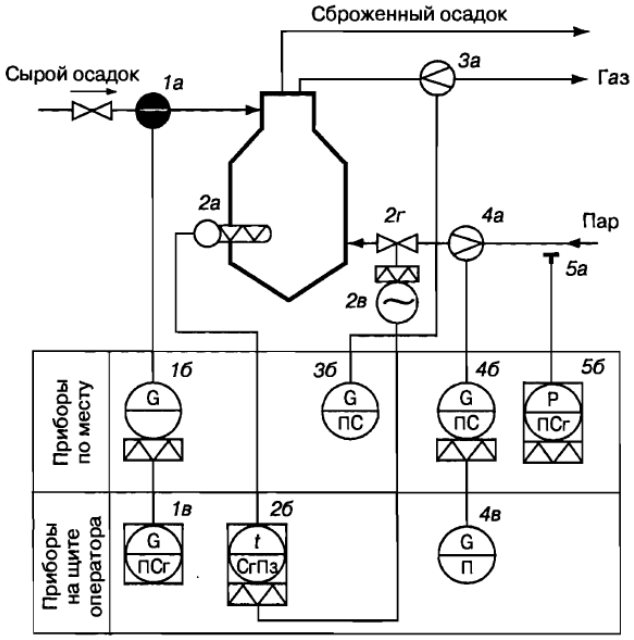


Рис. 5.5. Схема АСР температуры в метантенке: 1а — измеритель расхода осадка; 1б, 1в— вторичные приборы расходомера осадка; 2а — датчик температуры; 2б — терморегулятор; 2в — исполнительный механизм; 2г — регулирующий клапан; 3а — измеритель расхода газа; 3б — дифманометр; 4а — измеритель расхода пара; 4б, 4в — показывающий и самопишущий дифманометры; 5а — отбор давления пара; 5б — манометр

В некоторых схемах автоматики при аварийном отключении насоса предусматривается автоматическое включение насоса другого метантенка с переключением задвижек и подачей аварийного сигнала на пульт управления.

Автоматический подогрев осадка может производиться и с помощью парового инжектора. Однако при этом достигается лишь частичное перемешивание осадка и выравнивание его температуры происходит очень медленно. Поэтому при применении парового инжектора осуществляется дополнительное перемешивание с помощью гидроэлеваторов, включение которых производится автоматически по заданной программе. Схема автоматического контроля и регулирования температуры в метантенке приведена на рис. 5.5.

5.5. Автоматизация процесса механического обезвоживания осадков

В цехах механического обезвоживания осадков сточных вод все более широко применяют системы автоматизации, укомплектованные микропроцессорными контроллерами (МПК), обеспечивающими максимальную эффективность эксплуатации фильтров и центрифуг периодического и непрерывного действия.

Рассмотрим вначале систему управления фильтром периодического действия типа ФПАКМ-25 (рис. 5.6). Процесс обезвоживания в таком фильтре включает две основные стадии: собственно фильтрование и вспомогательные операции (промывка, просушка, разгрузка фильтра и регенерация фильтрующего основания). Все операции второй стадии осуществляются во времени с обратной связью об использовании команд по конечным положениям рабочих органов. В системе управления установлен расходомер подачи осадка, его сигнал поступает в МПК «Ремиконт», который вычисляет среднюю производительность фильтра, определяет максимум средней производительности по продолжительности операции и выдает команды на блок управления, переключающий режим фильтра с операции фильтрования на выполнение вспомогательных операций.

При повышении концентрации фильтр быстрее заполняется осадком, быстрее достигается максимум средней производительности и, соответственно, микропроцессор раньше дает команду на переключение с операции фильтрования на выполнение вспомогательных операций. Применение рассмотренной системы обеспечивает повышение производительности за цикл на 20—25%.

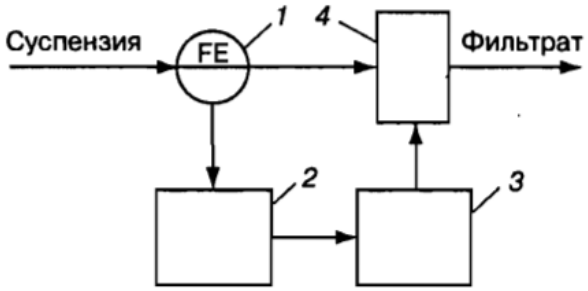


Рис. 5.6. Схема АСР фильтра периодическоro действия ФПАКМ-25: 1- измеритель расхода суспензии (осадка); 2 - микроконтроллер «Ремиконт»; 3 - блок управления; 4 - фильтр

При автоматизации управления фильтрами непрерывного действия, например, барабанными вакуум-фильтрами, необходимо обеспечить изменение частоты вращения рабочего органа обратно пропорционально полному гидравлическому сопротивлению. Изменение перепада давления на рабочем органе фильтра в зоне фильтрования прямо пропорционально полному гидравлическому сопротивлению. И то и другое целесообразно при стабильном уровне в ванне фильтра, максимальной эффективности работы зон просушки и промывки осадка. Поэтому типовая микропроцессорная система автоматического управления (рис. 5.7) содержит следующие четыре контура регулирования.

1. Контур стабилизации уровня осадка в ванне фильтра включает датчик уровня 4, сигнал его подается на вход МПК 77, который управляет подачей суспензии в корыто фильтра, воздействуя на положение регулирующей заслонки 3 через преобразователь 6. При повышении уровня МПК прикрывает заслонку, при понижении — открывает. Если при полностью открытой заслонке уровень в ванне продолжает увеличиваться, МПК оставляет заслонку полностью открытой и воздействует на привод рабочего органа, уменьшая частоту его вращения. Такое воздействие, подаваемое через преобразователь 10 на электродвигатель 9, снижает производительность фильтра, но в противном случае уровень в ванне будет падать, произойдут срыв вакуума и прекращение работы фильтра. При переводе управления по уровню на привод рабочего органа другие управляющие воздействия на этот привод отключаются.

2. Контур управления частотой вращения рабочего органа по полному гидравлическому сопротивлению. В этом контуре наиболее важным является измерение полного гидравлического сопротивления, которое осуществляется индукционным расходомером 2 на линии подачи осадка в ванну фильтра и вакуумметром 8 на линии отвода фильтрата из зоны фильтрования. Сигналы от этих измерителей (Q — расход суспензии, АР — вакуум в зоне фильтрования) поступают на вход МПК 77, где путем деления этих сигналов определяется полное гидравлическое сопротивление R = ΔP/Q.

Частота вращения рабочего органа изменяется по формуле $\omega = \omega_0 - kR$. При увеличении гидравлического сопротивления МПК уменьшает частоту вращения привода 9 рабочего органа фильтра, а при уменьшении сопротивления — увеличивает ее. Такое управление существенно снижает колебания влажности и степень обезвоживания осадка.

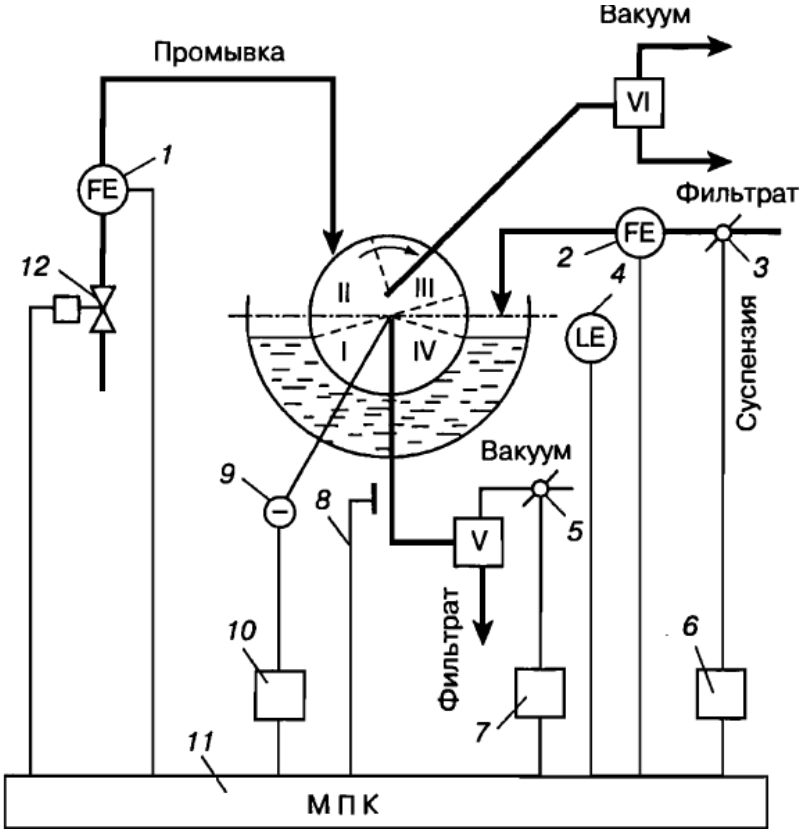


Рис. 5.7. Схема АСР вакуум-фильтра непрерывного действия: I—IV — зоны соответственно фильтрования, промывки, просушки и отдувки; V — ресивер зоны фильтрования; VI — ресивер зон промывки и просушки осадка; 7 — измеритель расхода промывной жидкости; 2 — расходомер осадка; 5, 5 — регулирующие заслонки; 4 — измеритель уровня; 6, 7, 10 — преобразователи; 8 — вакуумметр; 9 — привод рабочего органа фильтра; 11 — микропроцессорный контроллер (МПК); 12 — регулирующий клапан

3. Контур управления вакуумом в зоне фильтрования. По рассчитанному МПК значению полного гидравлического сопротивления R осуществляется воздействие на регулирующую заслонку 5 на линии вакуума через преобразователь 7. При увеличении R заслонка открывается. При изменении вакуума в зоне фильтрования необходимо поддержание его максимального значения в зонах просушки и промывки осадка.

4. Контур стабилизации расхода промывной жидкости включает измеритель расхода 7 (чаще всего ротаметр) и регулирующий орган 12 (клапан с исполнительным механизмом). Сигнал от расходомера 1 поступает на вход МПК 11, который выдает сигнал на регулирующий клапан 12. В зависимости от конкретных условий работы цеха или участка обезвоживания контур стабилизации расхода промывной жидкости может быть связан с другими параметрами процесса по каскадной схеме. Так, иногда расход промывной

жидкости изменяют пропорционально частоте вращения рабочего органа или полному гидравлическому сопротивлению. Необходимость такой связи определяют индивидуально, в зависимости от требований конкретной технологической схемы.

Управление центрифугами непрерывного действия значительно проще, однако при этом необходимо введение приоритетов на ограничения выходных параметров процесса центрифугирования. Например, при автоматизации шнековой центрифуги к выходным параметрам относятся концентрация фугата и крутящий момент на валу редуктора, а управляющий параметр лишь один — подача исходной суспензии (осадка). Крутящий момент имеет более высокий приоритет, так как превышение его допустимого значения может вызвать аварию центрифуги. Поэтому в АСР такого процесса обезвоживания (рис. 5.8) предусмотрено переключение каналов управления в зависимости от ситуации, в которой работает центрифуга. Система содержит измеритель 3 и регулятор 6 крутящего момента МКР, измеритель 4 и регулятор 5 концентрации фугата Сф, управляющее устройство 7 и коммутатор каналов регулирования 8.

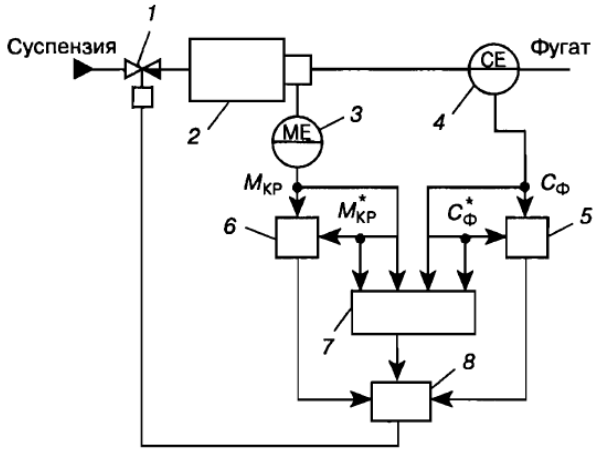


Рис. 5.8. Схема АСР шнековой центрифуги: 1 — регулирующий клапан; 2 — центрифуга; 3 — измеритель крутящего момента; 4 — измеритель концентрации фугата; 5,6 - регуляторы; 7 — управляющее устройство; 8 — коммутатор

При низких концентрациях исходной суспензии зависимости Сф и Мкр от расхода осадка Q имеют вид кривых 1 и 2 (рис. 5.9). Из рисунка видно, что производительность центрифуги Q1, соответствующая ограничению на концентрацию фугата Сф*, меньше производительности Q2, соответствующей ограничению на крутящий момент Л/КР. Поэтому управляющее устройство 7через коммутатор 8 подключает клапан 7 к выходу регулятора 5 и система начинает работать в режиме стабилизации концентрации фугата: Сф = Сф.

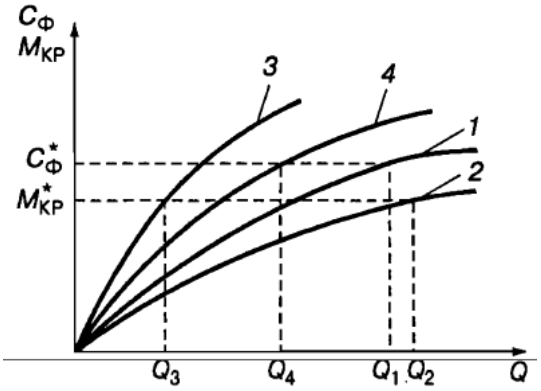


Рис. 5.9. Характеристики шнековой центрифуги по каналам «расход Q — крутящий момент МКР» (кривые 2 и 3) и «расход Q - концентрация фугата Сф» (кривые 1 и 4)

При высоких концентрациях зависимости смещаются и приобретают вид кривых 3 и 4. При этом производительность центрифуги Q3, соответствующая ограничению на крутящий момент МКР, меньше производительности р4, соответствующей ограничению на концентрацию фугата Сф. В этом случае управляющее устройство 7 подключает клапан 1 к выходу регулятора 6, обеспечивая работу АСР в режиме стабилизации крутящего момента: Мкр = Мкр*.

Моменты переключения определяются устройством 7 в зависимости от соотношения величин Мкр и Мкр*, а также Сф и Сф*. Таким образом, в рассмотренной АСР управление осуществляется посредством изменения ее структуры.

РАЗДЕЛ 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУТП)

Темы раздела:

Назначение и общая характеристика АСУТП
Техническое обеспечение АСУ ТП
Программное и математическое обеспечение АСУ ТП
Организационное обеспечение и оперативный персонал АСУ ТП
Основные этапы создания АСУ ТП
Оценка технико-экономической эффективности систем автоматизации

6.1. Назначение и общая характеристика АСУТП

Развитие строительства новых и модернизация действующих систем ВиВ потребовали создания гораздо более совершенных систем управления, чем рассмотренные выше локальные АСР, функции которых ограничиваются автоматизированным контролем, противоаварийной защитой и регулированием (стабилизацией или изменением по заданной программе) основных технологических параметров. Эти новые системы, как уже отмечалось в первой главе, получили название автоматизированных систем управления (АСУ ТП). Их создание стало возможным благодаря внедрению в практику ВиВ современных ЭВМ, обладающих большими вычислительными ресурсами, высокой надежностью и позволяющих использовать их для управления технологическими процессами в «реальном» времени, т. е. в едином темпе с развитием управляемого процесса.

Совокупность технологического оборудования и реализуемого на нем технологического процесса является технологическим объектом управления (ТОУ).

Человекомашинную систему, обеспечивающую автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для управления, называют автоматизированной системой управления (АСУ). Таким образом, АСУ ТП — это АСУ для выработки и реализации управляющих воздействий на ТОУ в соответствии с принятым критерием управления — показателем, характеризующим качество работы ТОУ и принимающим определенные значения в зависимости от управляющих воздействий. Совокупность совместно функционирующих ТОУ и АСУ ТП образует автоматизированный технологический комплекс (АТК).

АСУ ТП отличается от АСР более совершенной организацией потоков информации; практически полной автоматизацией процессов получения и обработки информации; возможностью активного диалога оперативного персонала с управляющими вычислительными машинами (УВМ) в процессе управления для выработки наиболее эффективных решений; более высокой степенью автоматизации функций управления, включая пуск и останов оборудования.

От систем автоматизированного управления цехами и водооб-рабатывающими станциями, являющимися высшей ступенью ав-томатизации, АСУ ТП отличается значительной степенью участия человека в процессе управления. По мере технического совершенствования систем ВиВ и развития АСУ ТП эти различия уменьшаются. В настоящее время в системах ВиВ переход к более полной автоматизации тормозится несовершенством технологических процессов (наличием немеханизированных технологических операций, низкой надежностью оборудования и т.д.), недостаточной надежностью средств автоматизации и вычислительной техники, трудностями математического описания задач, решаемых человеком в АСУ ТП, и другими причинами. Для систем ВиВ к настоящему времени сформированы основные представления об АСУ ТП, их функциях и принципах построения; созданы документы, регламентирующие порядок их разработки, внедрения и эксплуатации. Каждая АСУ ТП водообработки характеризуется

целью управления, функциональной, технической и организационной структурами. При построении этих систем необходимо сочетание цели их функционирования (задаваемой критерием управления) и множества взаимосвязанных функций, достаточного для достижения главной цели.

Глобальная цель управления ТОУ с помощью АСУ ТП состоит в поддержании экстремального (максимального или минимального) значения критерия управления при выполнении всех условий, определяющих множество допустимых значений управляющего воздействия. Прямое решение такой задачи управления возможно лишь для относительно простых систем ВиВ. В большинстве же случаев необходимо проводить декомпозицию (разбиение) глобальной цели управления на ряд частных целей, для достижения которых ограничиваются решением более простых задач меньшей размерности.

Функцией АСУ ТП называют действия системы, направленные на достижение одной из частных целей управления, которые, как и реализующие их функции, находятся в определенном соподчинении, образуя функциональную структуру АСУ ТП. Элементами этой структуры являются отдельные функции, связи между которыми указывают порядок их выполнения. Функции АСУ ТП делятся на информационные, управляющие и вспомогательные.

Информационные функции — это функции, цель которых состоит в сборе, преобразовании и хранении информации о состоянии ТОУ,

представлении этой информации оперативному персоналу или передачи ее для последующей обработки. Основными информационными функциями являются: первичная обработка информации о текущем состоянии ТОУ; обнаружение отклонений технологических параметров и показателей состояния оборудования от установленных значений; расчет значений неизмеряемых величин (косвенные измерения, расчет ТЭП, прогнозирование и т.д.); оперативное отображение и регистрация информации; обмен информацией с оперативным персоналом; обмен информацией со смежными и вышестоящими АСУ.

Управляющие функции — это функции, задачей которых является поддержание экстремального значения критерия управления в условиях изменяющейся производственной ситуации. Они делятся на две группы: первые служат для определения оптимальных управляющих воздействий, при которых поддерживается оптимальный (или близкий к нему, т.е. рациональный) режим работы ТОУ; ко второй группе относятся функции, обеспечивающие реализацию этого режима путем формирования управляющих воздействий на ТОУ. Управляющие функции второй группы соответствуют традиционным функциям, рассмотренным в предыдущих главах, АСР-стабилизации, программному регулированию и про-граммно-логическому управлению технологическими процессами.

Вспомогательные функции — это функции, обеспечивающие решение внутрисистемных задач.

Типовая функциональная структура АСУ ТП для систем ВиВ с непрерывными технологическими процессами представлена на рис. 6.1. Систему управления считают принадлежащей к классу АСУ ТП, если с ее помощью реализуются как минимум функции 7, 2, 4—1. Для реализации этих функций АСУ ТП необходимы ее техническое, программное, информационное и организационное обеспечение, а также обслуживающий персонал.

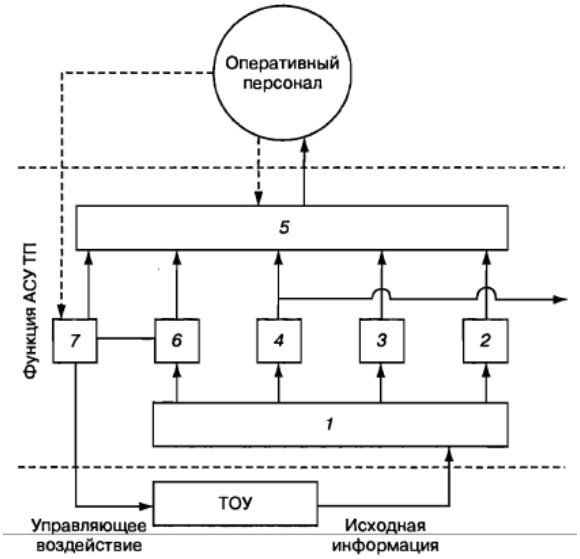


Рис. 6.1. Типовая функциональная структура АСУ ТП: 1 — первичная обработка информации (И); 2 — обнаружение отклонений технологических параметров и показателей состояния оборудования от установленных значений (И); 3 — расчет неизмеряемых величин и показателей (косвенные измерения, расчет ТЭП, прогнозирование и т.п.) (И); 4— подготовка информации и выполнение процедур обмена со смежными и вышестоящими АСУ (И); 5 — оперативное и (или) по вызову отображение и регистрация информации, обмен информацией с оперативным персоналом (И); 6 — определение рационального режима ведения технологического процесса (У); 7 — формирование управляющих воздействий, реализующих выбранный режим (У); И — информационные функции; У — управляющие функции

6.2. Техническое обеспечение АСУ ТП

Техническое обеспечение АСУ ТП составляет комплекс технических средств (КТС), содержащий следующие основные элементы: средства получения информации о текущем состоянии ТОУ (источники информации); управляющий вычислительный комплекс (УВК), основу которого составляют средства вычислительной техники; технические средства для реализации функций локальных АСР; исполнительные устройства, непосредственно реализующие управляющие воздействия на ТОУ.

Выбор КТС определяется специфическими требованиями, предъявляемыми к системам ВиВ и АСУ ТП. Основным из них является обеспечение малого времени реакции системы на изменение состояния ТОУ. Это отличает АСУ ТП от организационно-экономических АСУ, в частности от АСУ предприятиями водообработки (АСУ ПВ). Для обеспечения высокого быстродействия АСУ ТП основной объем информации о текущем состоянии ГОУ передается электрическими сигналами, которые поступают в УВК от источника информации — первичных измерительных преобразователей и позиционных сигнализаторов по кабельным линиям связи. В АСУ ТП применяют в основном первичные измерительные преобразователи из Государственной системы приборов и средств автоматизации (ГСП).

В комплекс технических средств многих АСУ ТП входят технические средства автоматизации преимущественно из состава электрической ветви ГСП, служащие для реализации функций локальных систем автоматизации (регулирования, программно-логического и дистанционного управления).

Специфическим компонентом КТС является УВК, в состав которого входят собственно вычислительный комплекс (ВК), устройство связи ВК с объектом (УСО) и с оперативным персоналом. В первых АСУ ТП водообработки использовались специализированные УВМ, в дальнейшем были созданы агрегатные комплексы

управляющей вычислительной техники, из которых можно компоновать УВК различного состава и вычислительной мощности в соответствии с особенностями конкретной АСУ ТП.

Первым и до сих пор наиболее распространенным типом технических структур АСУ ТП является централизованная. В системах с такой структурой вся информация, необходимая для управления АТК, поступает в единый центр — операторский пункт, где установлены практически все средства АСУ ТП, за исключением источников информации и исполнительных устройств, и где находится оперативный персонал. Такая техническая структура наиболее проста и имеет ряд очевидных эксплуатационных преимуществ. Недостатками же ее являются необходимость избыточного числа элементов для обеспечения высокой надежности работы АСУ ТП и большие затраты на дорогостоящий кабель. Поэтому она целесообразна для сравнительно небольших по мощности и компактных систем ВиВ с умеренными требованиями к надежности.

В связи с внедрением микропроцессорной техники все большее распространение получает распределенная техническая структура АСУ ТП, т.е. расчлененная на ряд автономных подсистем — локальных технологических станций, территориально распределенных по технологическим участкам объекта управления. Каждая локальная подсистема представляет собой однотипно выполненную централизованную структуру, ядром которой является управляющая микроЭВМ. Локальные подсистемы через свои микроЭВМ объединены в единую систему сетью передачи данных с высокой пропускной способностью. К сети подключается необходимое для управления АТК число терминалов для оперативного персонала. Программное обеспечение АСУ ТП связывает все элементы распределенной структуры в единое целое, обладающее рядом достоинств:

- возможностью получения высоких показателей надежности за счет расщепления АСУ ТП на семейство небольших и менее сложных подсистем и коллективного резервирования каждой из них через сеть;
- применением более надежных средств микроэлектронной вычислительной техники и большой гибкостью при композиции и модернизации технического и программного обеспечения;
- возможностью легкого наращивания вычислительной мощности АСУ ТП и значительной экономией дорогостоящего кабеля.

6.3. Программное и математическое обеспечение АСУ ТП

Ряд функций АСУ ТП, связанных в основном с локальным регулированием и управлением, реализуется аппаратурно. Большинство же функций реализуется программно, т.е. путем соответствующей обработки информации в УВК. Поэтому важнейшим компонентом АСУ ТП является ее программное обеспечение (ПО), т.е. совокупность программ, обеспечивающих реализацию функций АСУ ТП и заданное функционирование КТС. Различают общее и специальное ПО. Общее поставляется в комплекте со средствами вычислительной техники и обеспечивает организацию работы КТС, специальное разрабатывается при создании АСУ ТП и включает программы, реализующие ее информационные и управляющие функции. Для разработки специального ПО используют один из языков программирования высокого класса (чаще Фортран-V), а в общем ПО предусматривается транслятор с этого языка на машинный язык УВМ.

ПО создается на базе математического обеспечения (МО), под которым подразумевается совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач и обработки информации с применением вычислительной техники. Для реализации информационных и управляющих функций АСУ ТП создают специальное МО, в состав которого, в частности, входят алгоритмы сбора, обработки и представления информации; алгоритмы управления с математическими моделями соответствующих систем ВиВ; алгоритмы АСР.

Создание МО и ПО требует больших затрат труда и средств; доля их в общей стоимости АСУ ТП непрерывно возрастает. Если для первых АСУ ТП соотношение затрат

на КТС и МО с ПО равнялось примерно 15:1, то в современных системах оно приближается к 1:2.

Все взаимодействия как внутри АСУ ТП, так и с внешней средой представляют собой различные формы информационного обмена (передачу и прием информации в виде различных сигналов, данных, сообщений, тестов и т.д.). Для того чтобы рационально осуществлять такой обмен, необходима детальная регламентация этого процесса, например система классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, принятых форм массивов данных и документов и т.д. Кроме того, необходимы сами массивы данных и документов (в том числе нормативно-справочная информация), в совокупности обеспечивающие при эксплуатации АСУ ТП возможность выполнения всех ее функций. Правила обмена информацией, циркулирующей в АСУ ТП, образуют информационное обеспечение, которое в переведенном на машинный язык виде составляет содержание базы данных системы.

6.4. Организационное обеспечение и оперативный персонал АСУ ТП

Организационное обеспечение АСУ ТП представляет собой совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур системы, инструкций и регламента для оперативного персонала, обеспечивающего заданное функционирование АСУ ТП. Последнее характеризуется активным взаимодействием между людьми и программными, а также техническими средствами АСУ ТП. Поэтому организация оптимальных форм этого взаимодействия является одной из основных проблем разработки и эксплуатации АСУ ТП.

Оперативный персонал АСУ ТП состоит их технологов-операторов, осуществляющих управление системами ВиВ, и эксплуатационного персонала, обеспечивающего функционирование АСУ ТП (операторы ЭВМ, программисты, персонал по обслуживанию других видов аппаратуры КТС). Состав оперативного персонала конкретной АСУ ТП и взаимоотношения между отдельными работниками определяются организационной структурой системы. Упрощенная схема взаимодействия основных компонентов АСУ ТП изображена на рис. 6.2.

Оперативный персонал может работать в контуре управления или вне его. При работе в контуре управления он реализует все функции управления или часть их, используя рекомендации по рациональному управлению ТОУ, выработанные КТС. Такой режим функционирования называют информационно-советующим. Если оперативный персонал работает вне контура управления, он задает АСУ ТП режим работы и осуществляет контроль за его соблюдением. В этом случае в зависимости от состава КТС АСУ ТП может функционировать в комбинированном (супервизорном) режиме, при котором производится автоматическое изменение заданий и параметров настройки локальных АСР, или в режиме непосредственного цифрового управления (НЦУ), при котором УВК непосредственно воздействует на исполнительные устройства, изменяя управляющие воздействия на ТОУ.

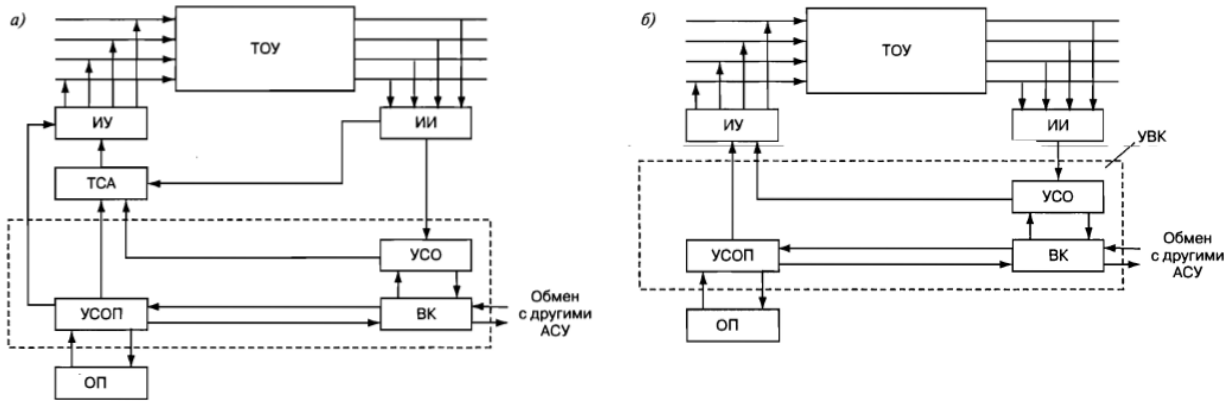


Рис. 6.2. Техническая структура КТС АСУ ТП: а — супервизорный режим; б — режим НЦУ;ТОУ — технологический объект управления; ИИ — источники информации; УСО — устройство связи с объектом; ВК — вычислительный комплекс; УСОП — устройство связи с оперативным персоналом;УВК — управляющий вычислительный комплекс; ОП — оперативный персонал; ТСА — технические средства автоматизации для реализации функций локальных систем; ИУ — исполнительные устройства

6.5. Основные этапы создания АСУ ТП

Как правило, АСУ ТП разрабатываются для вновь строящихся или реконструируемых систем ВиВ. При этом автоматизируемый ТОУ может либо существенно отличаться от действующих прототипов (например, при разработке очистных сооружений, мощность которых значительно превышает мощность существующих), либо быть близким к ним. В каждом из этих случаев организация и содержание работ по созданию АСУ ТП имеют свои особенности, однако общая их последовательность остается неизменной и складывается из следующих пяти стадий: техническое задание (ТЗ), технический проект (ТП), рабочий проект (РП), внедрение АСУ ТП и анализ ее функционирования.

На стадии ТЗ основным этапом являются предпроектные научно-исследовательские работы (НИР), обычно выполняемые организацией-разработчиком совместно с предприятием-заказчиком. Главная задача предпроектных НИР — изучение системы ВиВ как объекта управления. При этом определяют цель и критерий качества функционирования ТОУ, технико-экономические показатели (ТЭП) объекта-прототипа, их связи с технологическими параметрами, структуру ТОУ, т.е. входные воздействия (в том числе контролируемые и неконтролируемые возмущения и управляющие воздействия), выходные параметры и связи между ними, структуру математических моделей, стабильность параметров (степень стационарности ТОУ), характеристики возмущающих воздействий.

Результаты, полученные на этапе предпроектных НИР, применяют на этапе эскизной разработки АСУ ТП, в котором выполняются следующие работы:

- выбор критерия и постановка задачи оптимального управления объектом, а также при необходимости ее декомпозиция;
- выбор методов решения глобальной и локальных задач управления, на основе которых в дальнейшем разрабатываются алгоритмы оптимизации;
- разработка функциональной и алгоритмической структур АСУ ТП;
- определение объема информации о состоянии ТОУ и ресурсов ВК (быстродействие, объем запоминающих устройств), необходимых для реализации всех функций АСУ ТП;
- предварительный выбор КТС, и прежде всего УВК;
- предварительный расчет технико-экономической эффективности АСУ ТП.

Центральное место среди работ этой стадии занимает математическая постановка задачи оптимального управления ТОУ. Остальные задачи данного этапа (кроме расчета ТЭП) относятся к синтезу АСУ ТП, при выполнении которого широко применяют метод аналогий. Накопленный опыт АСУ ТП для систем ВиВ различной степени сложности позволяет перевести разработку ряда функций и алгоритмов из категории научных работ в категорию технических, выполняемых проектным путем. К их числу относятся многие информационные функции (первичная обработка информации, расчет ТЭП, усреднение, прогнозирование и др.), а также типовые функции локальных АСР, реализуемые в АСУ ТП программным способом (сигнализация, противоаварийная блокировка, регулирование с использованием типовых законов при НЦУ и др.).

6.6. Оценка технико-экономической эффективности систем автоматизации

Оценка технико-экономической эффективности является завершающим этапом разработки АСР и АСУ ТП. Выполняют его специалисты по экономике, а исходные после

внедрения системы данные они получают от специалистов по автоматизации, поэтому кратко рассмотрим некоторые узловые моменты расчетов.

Основным показателем экономической эффективности любой системы автоматизации служит годовой экономический эффект от ее внедрения, который рассчитывают по формуле:

$Э=(А_2-С_2)-(А_1-С_1)-Ен(К_2-К_1)$

где $А_1$, $А_2$ — годовые объемы реализации продукции в оптовых ценах до и после внедрения системы, тыс. руб.;

$С_1$, $С_2$ — себестоимость продукции до и после внедрения системы, тыс. руб.;

$К_1$, $К_2$ — капитальные затраты на автоматизацию продукции до и после ввода системы в действие, тыс. руб.; Ен — нормативный отраслевой коэффициент капитальных вложений в средства автоматизации и вычислительную технику.

Источниками эффективности автоматизации систем ВиВ обычно являются прирост объема обрабатываемых потоков природных и сточных вод и (или) снижение себестоимости их очистки. Улучшение этих показателей чаще всего достигается за счет уменьшения расхода реагентов, материалов и энергии на единицу потока (например, 1 $м^3$ воды) благодаря более точному поддержанию оптимального технологического режима, повышению качества очистки, увеличению производительности оборудования за счет сокращения рабочего времени из-за неплановых остановок процесса, вызванных ошибками управления и др. На этапе предпроектных НИР должны быть выявлены резервы производства, которые могут быть использованы благодаря применению систем автоматизации.

Например, если при использовании АСР технологический агрегат простаивает в среднем 20% планового рабочего времени, из которых ′/4 вызвана ошибками обслуживающего персонала из-за несвоевременного обнаружения предаварийных ситуаций, то применение АСУ ТП, реализующей функции прогноза и анализа протекания процесса, может устранить эти потери. Тогда объем обрабатываемых потоков воды в натуральном исчислении возрастет на 5%, что приведет к снижению себестоимости очистки.

Накопленный опыт автоматизации различных систем ВиВ показывает, что резервы экономической эффективности, которые могут быть использованы благодаря автоматизации, обычно составляют от 0,5 до 6%. При этом чем лучше отработана технология водообработки, тем, как правило, меньше резервы. Однако не все выявленные (потенциальные) резервы могут быть использованы после внедрения АСР или АСУ ТП. Фактическая эффективность всегда оказывается меньше потенциальной из-за невозможности создания идеальных систем автоматизации. Это связано с неполной адекватностью математических моделей реальным ТОУ, по которым рассчитываются оптимальные режимы; погрешностями измерений выходных параметров; отказом элементов программного и технического обеспечения, из-за которых снижается качество выполнения функций АСУ ТП.

Реальный эффект обычно составляет от 25 до 75% потенциального, причем, как правило, чем больше потенциальный эффект, тем в меньшей степени он реализуется. Основным показателем технико-экономической эффективности систем автоматизации является срок их окупаемости, определяемый по формуле:

$$ТОК = (К_2 – К_1)/(А_2 - С_2) - (А_1 – С_1)$$

Этот показатель должен быть не больше нормативного, который для строительства и коммунального хозяйства равен 2 годам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21.208-2013 «Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах».
2. ГОСТ 34.003-90 «Комплекс стандартов на автоматизированные системы».
3. СП 31-13330-2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения».
4. Абдулмажидов Х. А. Гидромелиорация земель и водное хозяйство / Х. А. Абдулмажидов, Н. А. Александров, М. С. Али [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 358 с.
5. Аверченков В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов: учебное пособие для вузов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. — 2-е изд., стер. — Москва: Флинта, 2011. — 229 с.
6. Беляев П. С. Системы управления технологическими процессами: учебное пособие / П. С. Беляев, А. А. Букин; Тамбовский государственный технический университет. — Тамбов: ТГТУ, 2014. — 156 с.
7. Бенин Д. М. Влияние формы элементов проточной части на регулирующую способность гидродинамических стабилизаторов расхода / Д. М. Бенин // Перспективы науки. – 2010. – № 11(13). – С. 59-63. – EDN OXHWBR.
8. Бенин Д. М. Графическое моделирование объектов водохозяйственного комплекса / Д. М. Бенин // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 12-1. – С. 77-79. – EDN WXTNPH.
9. Бенин Д. М. Обзор средств автоматизированного проектирования / Д. М. Бенин // ФЭн-наука. – 2012. – № 5(8). – С. 17-19. – EDN PAMXEF.
10. Бенин Д. М. Оценка технического состояния инженерных систем зданий и сооружений / Д. М. Бенин ; Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «ДПК Пресс», 2016. – 198 с. – ISBN 978-5-91976-000-0. – EDN MPVWIH.
11. Бенин, Д. М. Средства автоматизации водопропускных мелиоративных сооружений / Д. М. Бенин, В. Л. Снежко. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «ДПК Пресс», 2018. – 108 с. – ISBN 978-5-91976-113-6. – EDN UIMNRH.
12. Бенин Д. М. Увеличение диапазона работы гидродинамических водовыпусков-стабилизаторов расхода / Д. М. Бенин, В. Л. Снежко // Природообустройство. – 2011. – № 2. – С. 85-87. – EDN NUJATX.
13. Валиуллина В. А. Разработка функциональных схем автоматизации технологических процессов: учебное пособие / В. А. Валиуллина, В. А. Садофьев. — Казань: Казанский научно-исследовательский технологический университет (КНИТУ), 2013. — 83 с..
14. Гудков А. Г. Информационные технологии в проектировании и эксплуатации инженерных систем: водоснабжение и водоотведение: учебное пособие / А. Г. Гудков; Вологодский государственный университет. — Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. — 116 с. — ISBN 978-5-907606-07-4.
15. Есин А. И. Математическое моделирование водопроводящего пояса дождевальных машин / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева // Научная жизнь. – 2017. – № 9. – С. 20-28.
16. Журавлева Л. А. Оценка качества полива спринклеров с диафрагмовым запорным механизмом / Л. А. Журавлева, Д. М. Бенин, Н. В. Гавриловская // Природообустройство. – 2026. – Т. 19, № 1. – С. 32-38.
17. Зуев К. И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: учебное пособие / К. И. Зуев; Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2016. — 224 с.

18. Рульнов А. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: учебник / А. А. Рульнов, К. Ю. Евстафьев. — 2-е изд. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 192 с. + Дополнительные материалы.

19. Рульнов А. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: учебник / А. А. Рульнов. — 2-е изд. — Москва: ИНФРА-М, 2023. — 192 с. — (Среднее профессиональное образование). — ISBN 978-5-16-106377-4.

20. Снежко В.Л. Автоматизированный измерительный комплекс для мониторинга уровневого режима каналов и параметров атмосферы / В. Л. Снежко, Д. М. Бенин, Н. В. Гавриловская [и др.] // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 6-14.

21. Снежко В.Л. Устройство автоматического контроля уровня воды для мелиоративных объектов / В. Л. Снежко, Д. М. Бенин, А. В. Подобный, Н. В. Гавриловская // Аграрная наука. – 2023. – № 1. – С. 83-89.

22. Соловьев Д. А. Цифровые технологии в сельском хозяйстве / Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева, Р. Н. Бахтиев // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 11. – С. 95-98.

Бенин Дмитрий Михайлович
Гавриловская Надежда Владимировна
Журавлева Лариса Анатольевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Учебное пособие

ISBN 978-5-00279-231-3

9 785002 792313 >

Подписано в печать 24.08.2026 г.
Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 7,75. Тираж 100 экз. Заказ № 4419-26

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО «Амирит», 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.
Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33
Сайт: amirit.ru