

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**
сборник учебно-методических материалов
для направления подготовки 18.03.01 – Химическая технология

Благовещенск, 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
университета*

Составитель: Г.Г. Охотникова

Системы управления химико-технологическими процессами: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 18.03.01. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

Рассмотрен на заседании кафедры химии и естествознания 09.09.2017, протокол № 2.

© Амурский государственный университет, 2017
© Кафедра химии и естествознания, 2017
© Г.Г. Охотникова, составление

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
Краткое изложение теоретического материала	5
Методические рекомендации к лабораторным занятиям	42
Методические указания для самостоятельной работы	43

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины является формирование знаний и практических навыков по основам базового автоматического регулирования в химико-технологических процессах, а также приобретение опыта в области автоматизации технологических процессов.

Задачи дисциплины:

- формирование навыков теоретического расчета характеристик технических систем;
- формирование навыков анализа технологических процессов и их аппаратного обеспечения как объектов управления
- формирование представлений о системах автоматики, осуществляющих управление химико-технологическими процессами со случайными возмущающими и задающими воздействиями;
- формирование навыков управления химико-технологическими системами и знаний о методах их регулирования.

В процессе освоения дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие компетенции.

- готовность применять аналитические и численные методы решения поставленных задач, использовать современные информационные технологии, проводить обработку информации с использованием прикладных программных средств сферы профессиональной деятельности, использовать сетевые компьютерные технологии и базы данных в своей профессиональной области, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров оборудования (**ПК-2**);
- готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования (**ПК-20**);
- готовность разрабатывать проекты в составе авторского коллектива (**ПК-21**);
- способность проектировать технологические процессы с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства в составе авторского коллектива (**ПК-23**).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать: основные понятия теории управления технологическими процессами; статические и динамические характеристики объектов и звеньев управления; основные виды систем автоматического регулирования и законы управления; типовые системы автоматического управления в химической промышленности; методы и средства диагностики и контроля основных технологических параметров;

2) Уметь: определять основные статические и динамические характеристики объектов; выбирать рациональную систему регулирования технологического процесса; выбирать конкретные типы приборов для диагностики химико-технологического процесса;

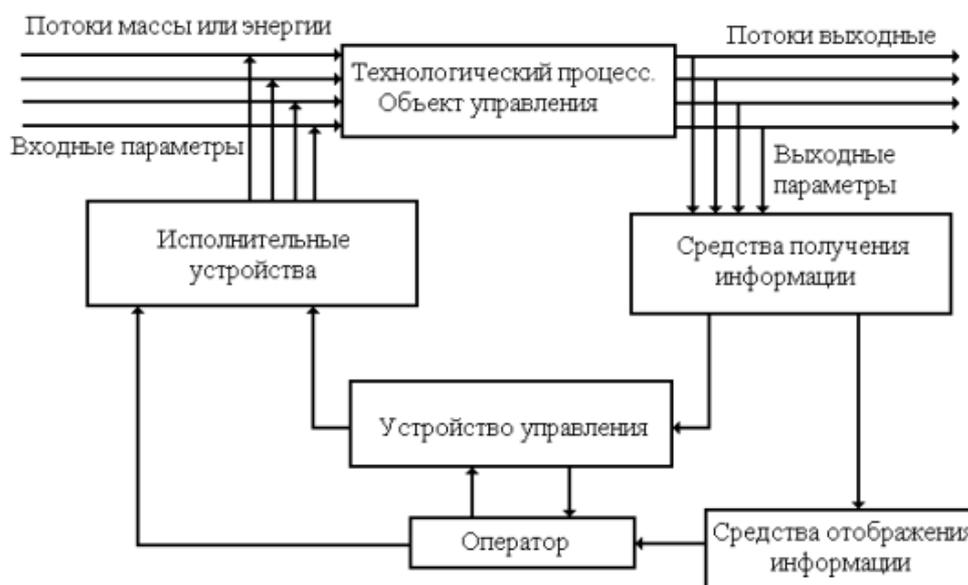
3) Владеть: методами управления химико-технологическими системами и методами регулирования химико-технологических процессов.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Математические основы теории линейных систем автоматики

Управление технологическим процессом представляет собой задачу максимизации или минимизации некоторого критерия при выполнении ограничений на технологические параметры, накладываемые регламентом. В качестве параметров обычно выступают: себестоимость, энергозатраты, прибыль и др. Решение такой задачи является очень трудоемким, поэтому процесс разбивается на составляющие, которые характеризуются небольшим числом переменных. Как правило, такие составляющие совпадают с технологическими стадиями, для которых возможно сформулировать свои подзадачи управления, подчиненные общей задаче управления процессом в целом.

Схему системы управления технологическим процессом можно представить следующим образом:



Многие задачи управления технологическими процессами, приведенными на рисунке, можно решить путем стабилизации технологических параметров объекта относительно их заданных значений, то есть реализовать частный случай автоматического управления, получившего название регулирования.

Регулированием называют поддержание выходных параметров объекта относительно их заданных значений, постоянных или переменных, путем изменения подачи регулирующих воздействий. Если этот процесс осуществляется с помощью технических средств без участия человека, то он называется автоматическим. Под объектом регулирования понимают аппарат или совокупность аппаратов, в которых осуществляется регулируемый процесс. Если объект имеет один регулируемый параметр y и регулирующее воздействие x , то он называется одномерным. Если объект имеет несколько регулируемых \bar{y} параметров и регулирующих воздействий \bar{x} , то он называется многомерным. Если внутренние связи между регулируемыми параметрами отсутствуют или ими можно пренебречь, то такой объект называется объектом с несвязанными параметрами. Если внутренние связи между регулируемыми параметрами присутствуют, то такой объект называется объектом со связанными параметрами.

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

В качестве средств получения информации используются измерительные приборы и преобразователи (датчики), работающие в автоматическом режиме.

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

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

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

Связь между входным и выходным параметрами в отдельном элементе (или системе) в динамике описывается дифференциальным уравнением. Дифференциальное уравнение аналитически выражает характер изменения во времени выходного параметра при определенном виде входного параметра. Исследование АСР существенно упрощается при использовании прикладных математических методов операционного исчисления, поскольку позволяет от решения ДУ перейти к решению алгебраических уравнений. Например, функционирование некоторой системы описывается ДУ вида

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x,$$

где x и y - входная и выходная величины. Если в данное уравнение вместо $x(t)$ и $y(t)$ подставить функции $X(s)$ и $Y(s)$ комплексного переменного s такие, что

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt \quad u \quad Y(s) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt,$$

то исходное ДУ при нулевых начальных условиях равносильно линейному алгебраическому уравнению

$$a_2 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_1 X(s) + b_0 X(s).$$

Такой переход от ДУ к алгебраическому уравнению называется преобразованием Лапласа, формулы функций $X(s)$ и $Y(s)$ соответственно формулами преобразования Лапласа, а полученное уравнение – операторным уравнением.

Новые функции $X(s)$ и $Y(s)$ называются изображениями $x(t)$ и $y(t)$ по Лапласу, тогда как $x(t)$ и $y(t)$ являются оригиналами по отношению к $X(s)$ и $Y(s)$.

Переход от одной модели к другой достаточно прост и заключается в замене знаков

дифференциалов $\frac{d^n}{dt^n}$ на операторы s^n , знаков интегралов $\int \dots dt$ на множители $\frac{1}{s}$, а самих

$x(t)$ и $y(t)$ - изображениями $X(s)$ и $Y(s)$.

Для обратного перехода от операторного уравнения к функциям от времени используется метод обратного преобразования Лапласа. Общая формула обратного преобразования Лапласа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где $f(t)$ – оригинал, $F(j\omega)$ – изображение при $s = j\omega$, j – мнимая единица, ω – частота.

Комплексным числом называется выражение вида $z = \alpha + j\beta$, где α – вещественная часть комплексного числа; β – мнимая часть комплексного числа; $j = (-1)^{1/2}$. Если $\alpha = 0$, то

комплексное число называется чисто мнимым. При $\beta = 0$ комплексное число становится вещественным. Комплексные числа изображаются на комплексной плоскости.

Операционное исчисление служит для упрощения математических операций при расчётах, в частности при дифференцировании и интегрировании. Решение уравнений операционным методом состоит из трех этапов: приведение исходных уравнений к операторной форме; решение операторных уравнений; определение решений исходных уравнений по решениям операторных уравнений. Для получения операторных уравнений, функции, входящие в уравнение, подвергаются прямому преобразованию Лапласа.

Далее из операторных уравнений определяется изображение решения поставленной задачи. Чтобы отыскать решение исходных уравнений, необходимо совершить переход от изображения решения к его оригиналу. Этот переход реализуется с помощью обратного преобразования Лапласа.

Передаточной функцией $W(p)$ динамической системы называется отношение изображений Лапласа выходной и входной величин при нулевых начальных условиях

$$W(p) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]}$$

Передаточная функция является одним из способов задания динамических характеристик системы автоматического управления.

Частотные характеристики. Частотные характеристики описывают установившиеся колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе. Если на вход звена подать гармоническое воздействие вида

$$x = x_{max} \cdot \sin \omega t ,$$

то по окончании переходного процесса на выходе звена установятся колебания вида

$$\ln W(j\omega) = \ln[A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}] = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega)$$

т. е. отличающиеся от входных по амплитуде и фазе.

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость отношения амплитуды гармонических колебаний на выходе к амплитуде колебаний на входе звена от частоты, т. е. зависимость вида $A(\omega)$.

Фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) называется зависимость разности фаз между выходными и входными гармоническими колебаниями от частоты этих колебаний, т. е. зависимость вида $\varphi(\omega)$.

АЧХ и ФЧХ можно объединить в одну характеристику – амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ)

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

откуда следует, что модуль АФЧХ представляет собой АЧХ, а аргумент – ФЧХ.

Аналитические выражения для частотных характеристик могут быть получены по передаточной функции.

Система автоматического управления представляет совокупность автоматического управляющего устройства и объекта управления, связанных и взаимодействующих между собой в соответствии с алгоритмом управления. Их классифицируют по большому количеству признаков:

- по уровню автоматизации: системы ручного управления и автоматические системы управления;
- по методу управления: обыкновенные самонастраивающиеся системы и адаптивные самонастраивающиеся системы;
- по иерархии: одно- и многоуровневые системы;
- по функционалу: системы для координации работы механизмов; системы регулирования параметров технологических процессов; системы автоматического контроля; системы автоматической защиты и блокировки.
- по информационным признакам: разомкнутые и замкнутые системы управления.

Системы автоматического контроля используются для контроля различных параметров, сведения о которых необходимы для управления объектом. В состав системы автоматического контроля входят датчик (измеряет значение контролируемого параметра), усилитель и исполнительный элемент. Устройства, обеспечивающие передачу сигналов от датчика до исполнительного элемента, называются элементами передачи и связи. Система автоматического контроля не вмешивается в ход протекания технологического процесса.

В зависимости от вида исполнительного элемента различают 4 группы автоматического контроля:

- автоматическая сигнализация характерных или предельных значений параметров; сигнализирующее устройств (СУ) – лампочки, звонок, сирена;
- автоматическое указание значений контролируемых параметров; указывающий прибор (ПУ) может быть стрелочным, цифровым;
- автоматическая регистрация значений контролируемого параметра; регистрирующее устройство (РУ) – самописец;
- автоматическая сортировка различных изделий в зависимости от заданных значений контролируемых параметров (ПС – прибор сортирующий).

Технические средства автоматизации

Промышленные процессы должны уверенно управляться. Сенсорная техника помогает осуществлять эту комплексную задачу. Как правило, участвующие в производственном процессе сенсорные датчики подвергаются тяжелым нагрузкам, таким как, например, коррозия. В период эксплуатации сенсорного датчика показатели измерений не должны изменяться. Это достигается использованием высокочистых керамических материалов, которые уже успели утвердиться в данной сфере деятельности.

Типичными примерами применения являются:

- датчики давления (абсолютное и избыточное давление);
- датчики температуры;
- датчики влажности;
- датчики скорости.

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

$$Q = qU,$$

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

Измерения выполняются с помощью измерительных приборов и измерительных преобразователей. **Измерительный прибор** – это средство измерений, служащее для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Для измерения технологических параметров используется большое количество измерительных приборов, построенных по единой схеме.

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

Температурные датчики одни из самых важных атрибутов измерительной системы управления. Датчики температуры необходимы для контроля множества жизненно важных и критичных процессов. Существует огромное количество типов датчиков, каждый из которых характеризуется своими особенностями и предназначением. Но главными задачами остаются измерение температур требуемых объектов с необходимыми точностью, быстродействием и передача информационного либо управляющего сигнала далее в систему и реализация обратных связей в АСУТП, предупреждение выхода из строя оборудования.

Датчики делятся на первичные преобразователи и реализованные на их основе сложные электронные устройства с адаптацией к тому или иному эксплуатационному профилю. Вторые имеют стандартизированные выходные сигналы и легко встраиваются в промышленные АСУ.

Термометры сопротивления – это первичные преобразователи, основанные на изменении электрического сопротивления материалов под воздействием температуры. Термопреобразователи сопротивления оптимальны для высокоточных измерений в узких диапазонах измерения. Термосопротивления взаимозаменяемы и имеют практически линейные характеристики.

Термопреобразователи сопротивления представляют собой более сложные приборы, нежели простые резисторы. Их принцип работы основан на изменении электрического сопротивления полупроводниковых материалов либо металлов/сплавов под воздействием температуры окружающей среды. Термосопротивления главным образом применяются для измерения высоких температур, до нескольких тысяч градусов.

Термометры сопротивления используются для:

- высокоточного (до тысячных долей градуса) и высокостабильного измерения температуры среды в средних температурных диапазонах ($-200\dots+600$ °С в большинстве случаев) с передачей сигнала в информационно-управляющую систему;
- лабораторных стендов, эталонных измерений температур;
- унифицированных систем, требующие высокой взаимозаменяемости датчиков.

Основные достоинства термопреобразователей сопротивления заключаются в их взаимозаменяемости (датчики стандартизированы по номинальным статическим характеристикам), высокой точности и стабильности измерений, а также близости характеристик к линейным.

Недостатки в основном исходят из принципа работы и заключаются в том, что для данного вида датчиков требуется источник питания (тока) для запитывания резистора, они гораздо дороже простых термопар и имеют малый в сравнении с термопарами диапазон измерений.

Термопара – это первичный преобразователь, который использует эффект возникновения термо-ЭДС в зависимости от разности температур двух спаев. Термопары не требуют внешнего источника питания и имеют самый высокий температурный диапазон среди прочих датчиков температуры. Термопары просты в изготовлении и надежны.

Термопара представляет собой сплав металлов, разграниченный на «холодный» и «горячий» (или измерительный) концы, один из которых помещается в среду измерения. В работе используется эффект возникновения термо-ЭДС, зависящей от разницы температур между двумя концами. Этот сигнал необходимо специально обрабатывать. Современные производители выпускают стандартизированные термопары согласно номинальных статических характеристик.

Основные достоинства термопар:

- самый широкий диапазон работы из температурных датчиков ($-270\dots+3000$ °С), стабильность градуировки
- Простота и надежность, относительная дешевизна
- Компактность
- Малая инерционность

- Не требует питания
- Недостатки термопар:
 - для высокой точности (сотые доли градуса) необходима индивидуальная градуировка
 - Требуется вносить поправки по температуре холодного спая (свободного конца)
 - Существенная нелинейность термо-ЭДС
- При снятии сигнала нужно обеспечить защиту от помех и наводок электромагнитных полей

– Механические факторы, износ, коррозия влияют на градуировочную характеристику

Бесконтактные датчики температуры используются с удаленными и/или труднодоступными объектами в широком диапазоне температур, в опасных для человека условиях. Бесконтактные датчики температуры созданы для обеспечения контроля температуры удаленных или труднодоступных объектов. Отсутствие необходимости соприкосновения позволяет бесконтактным датчикам измерять очень большие диапазоны температур. Бесконтактные датчики применяются для контроля температуры во многих отраслях, где требуется удаленный контроль состояния объектов и возможность оценки температуры без непосредственного контакта.

Помимо этого, бесконтактные датчики используются для контроля температуры различных производственных процессов.

Современные бесконтактные датчики температуры по своему принципу работы являются детекторами инфракрасного излучения. Датчик способен определять температуру благодаря определению уровня электромагнитной энергии, излучаемой объектом контроля в инфракрасном диапазоне. При этом датчик может определять как очень низкие температуры до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и очень высокие – вплоть до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для работы с различными материалами и температурами необходимо проводить настройку прибора в зависимости от конкретных условий работы. Точность результатов измерения зависит от характеристик датчика, включая диапазон измеряемой длины волны, и излучательной способности объекта контроля. Эти параметры влияют на коэффициенты настройки датчика.

Современные бесконтактные датчики температуры способны определять температуру на большом удалении. Некоторые модели датчиков могут быть дополнительно снабжены лазерным указателем, позволяющим более точно захватывать объект для измерения.

Возможность измерения температуры без непосредственного контакта позволяет решать несколько задач:

- контроль температуры отдаленных и малодоступных объектов,
- определение температуры движущихся частей машин и механизмов,
- измерение температуры элементов под напряжением или в опасных условиях,
- контроль высокотемпературных производственных процессов,
- непрерывное отслеживание изменения температуры,
- контроль элементов и поверхностей объектов, недоступных для стандартных способов измерения,
- работа с объектами из материалов с невысокой теплопроводностью или низкой теплоемкостью.

Неоспоримые достоинства бесконтактных датчиков температуры обеспечивают большое число преимуществ перед любыми контактными способами температурного контроля:

- измерение температуры удаленных и малодоступных объектов и их поверхностей, включая работу в опасных условиях,
- измерение очень высоких значений температур, при которых другие датчики не способны работать,
- датчик всегда чистый, т.к. отсутствует необходимость контакта с объектом контроля,
- малое время отклика, что позволяет обеспечить высокую скорость получения результатов измерения,

- возможность работы с любыми материалами.
- При этом бесконтактные датчики очень просты в использовании.

Основным недостатком работы бесконтактных датчиков является необходимость тщательной настройки работы прибора для обеспечения высокой точности результатов. При этом необходимо вносить поправочные коэффициенты, учитывая тип контролируемой поверхности.

Для получения наиболее точных результатов измерения необходимо тщательно подбирать бесконтактный датчик температуры для работы в конкретных условиях и с заданными контролируемыми объектами и поверхностями.

Датчики давления являются устройствами, выдающими на выходе сигналы, зависящие от давления измеряемой среды. Эти устройства применяются в автоматизированных системах всех отраслей промышленности.

Давление необходимо учитывать при проектировании многих химических процессов. Давление определяется как сила, действующая на единицу площади, и измеряется в паскалях.

Существуют три типа измеряемого давления:

- *Абсолютное давление* – сумма атмосферного и избыточного давления;
- *Избыточное давление* – разница между абсолютным и атмосферным давлением;
- *Дифференциальное давление* – разность давлений между двумя точками.

Преобразователи давления используются для трансформации значения давления абсолютного, избыточного, гидростатического, разрежения, а также разности давления жидких сред и трансформации значения уровня в токовый унифицированный выходной сигнал и сигнал цифровой на базе протокола HART. Также преобразователи давления могут трансформировать значения уровня жидкости и расхода газа и жидкости.

Поскольку давление является одним из важнейших параметров многих производственных процессов, преобразователи пользуются высоким спросом для монтажа в автоматических системах управления производством.

Многие датчики давления функционируют на преобразовании давления в движение механической части. Кроме механических элементов (трубчатые пружины, мембраны) для замеров используются тепловые и электрические системы. Электронные элементы дают возможность осуществить производство датчиков давления на электронных элементах.

Датчик давления состоит из:

- первоначального преобразователя вместе с чувствительным элементом;
- корпуса датчика, имеющего различные конструкции;
- электрической схемы.

К датчикам давления с *механическими воспринимающими органами* относятся:

- 1) жидкостные датчики давления (U-образные системы),
- 2) поршневые системы,
- 3) пружинные системы: мембранные (плоские, бугристые, мягкие); сильфоны; манометрические трубчатые пружины.

Более обширно используются пружинные датчики давления. Действие их основано на возникновении упругой деформации пружины, являющейся чувствительным элементом прибора. Деформация появляется при изменении давления внутри либо снаружи пружины. Изменение формы элемента передается на подвижную часть прибора со стрелкой, перемещающейся по шкале, при снятии давления чувствительный элемент воспринимает первоначальную форму.

В технических манометрах и вакуумметрах обычно применяются упругие пружины: одновитковые, многовитковые, плоские мембраны и сильфоны (гармониковые мембраны).

Большинство датчиков давления жидкости имеют упругую структуру, где жидкость заключена в небольшой отсек по меньшей мере с одной упругой стенкой. При использовании данного метода, показания давления определяются путем измерения отклонения этой эластичной стенки, представляя результат непосредственным отсчетом через соответствующие

связи, либо через трансдуцированные электрические сигналы. Упругие датчики давления очень чувствительны, они довольно хрупкие и подвержены вибрации. Кроме того, они, как правило, значительно дороже, чем манометры, и поэтому в основном используются для передачи измеренных данных и измерения разности давлений. Теоретически можно использовать довольно широкий спектр упругих элементов для упругих датчиков давления. Однако большинство устройств используют ту или иную форму трубки Бурдона или диафрагмы.

Принцип, на котором основаны разного вида *трубки Бурдона*, заключается в следующем. Давление, подаваемое внутрь трубки, вызывает упругую деформацию эллиптического или овального сечения трубки в сторону круга, которая вызывает появление напряжений в продольном направлении, заставляющих трубку разгибаться, а свободный конец трубки перемещаться. Система рычагов и передач превращает это движение и возвращает стрелку, показывающую давление относительно круглой шкалы. Диапазон измерения такого манометра составляет от 10 Па до 1000 МПа. Трубные материалы могут быть изменены соответствующим образом в соответствии с требуемым условием процесса. Кроме того трубки Бурдона – портативные – и требуют минимального технического обслуживания, но могут быть использованы только для статических измерений и имеют низкую точность.

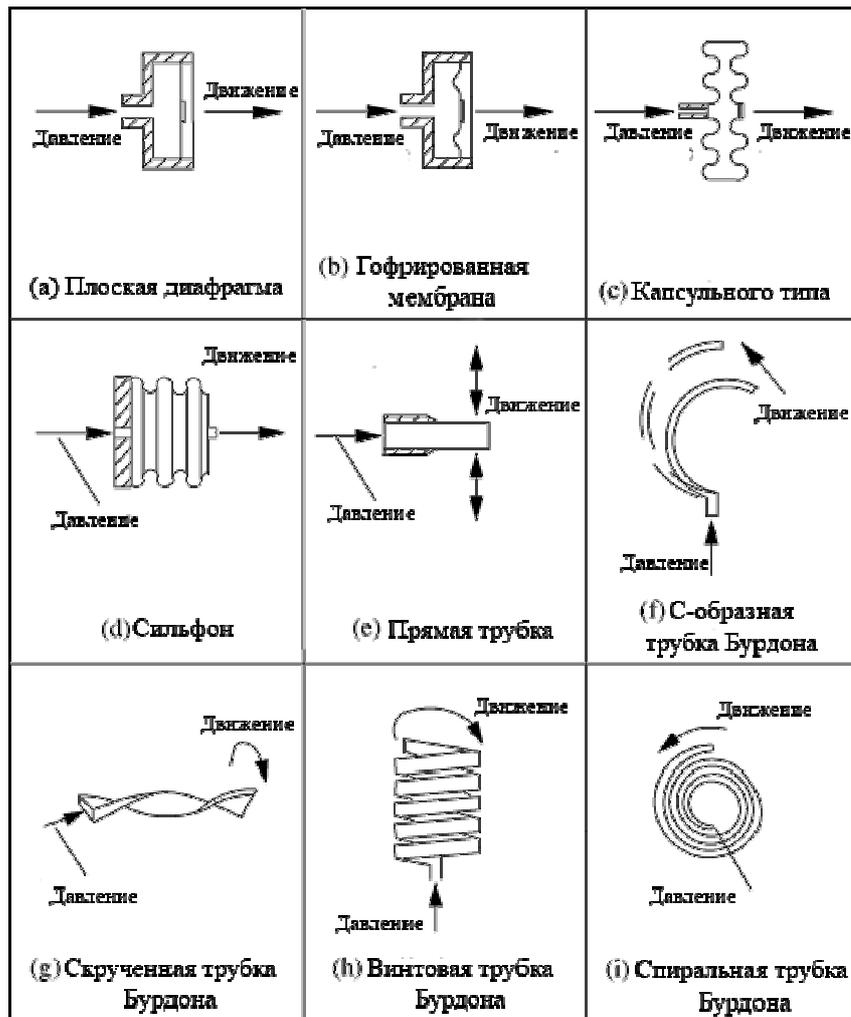
Материалом для трубчатых пружин может служить сталь, бронза, латунь. В зависимости от конструктивного исполнения трубчатые пружины могут быть одно- и многовитковые (винтовые и спиральные), S-образные и т.п. Распространены одновитковые трубчатые пружины, используемые в манометрах, которые предназначены для измерения давления жидкостей и газов, а также в таких типах манометров как глубиномер. Датчики С-типа могут быть использованы в диапазонах давлений приближающихся к 700 МПа; они имеют минимальный рекомендованный диапазон давления – 30 кПа (т.е. они не достаточно чувствительны для измерения разности давлений меньше чем 30 кПа).

Сильфоны имеют цилиндрическую форму и содержат много складок. Они могут деформироваться в осевом направлении при изменении давления (сжатие или расширение). Давление, которое должно быть измерено, прикладывается к одной стороне сильфона (внутри или снаружи), тогда как на противоположную сторону действует атмосферное давление. Абсолютное давление может быть измерено путем откачки воздуха из внешнего или внутреннего пространства сильфона, а затем измерением давления на противоположной стороне. Сильфон может быть подключен только к включающим/выключающим переключателям или к потенциометру и используется при низких давлениях, менее 200 Па, с чувствительностью 1,2 Па.

Мембраны изготовлены из круглых металлических дисков или гибких элементов, таких как резина, пластик или кожа. Материал, из которого изготовлена мембрана, зависит от того, используется ли свойства упругости этого материала или ему должен противостоять другой элемент (например, пружина). Мембраны, изготовленные из металлических дисков, используют упругие характеристики, а те, которым противостоят другие упругие элементы, изготовлены из гибких элементов. Мембраны очень чувствительны к резким изменениям давления. Мембраной, изготовленной из металла, можно измерить максимальное давление, равное примерно 7 МПа; мембраной, использующей упругий тип материала, можно измерять чрезвычайно низкие давления (0,1 кПа – 2,2 МПа) при подключении к емкостным преобразователям или к датчикам перепада давления. Диафрагмы бывают плоские, гофрированные и капсульного типа. Мембраны могут измерять дробные разности давления на очень маленьком диапазоне (эластичный тип) или большие перепады давления (металлический тип).

Мембраны настолько универсальны, что могут использоваться в очень агрессивных средах или в ситуациях с экстремальными избыточными давлениями.

Примеры упругих элементов датчиков давления показаны ниже:



Электрические датчики принимают данные полученные механическое воздействие от упругого датчика и включают в себя электрический компонент, таким образом, усиливая чувствительность и увеличивая сферы применения датчиков. Существуют следующие типы датчиков давления: емкостной, индуктивный, датчик магнетосопротивления (датчик Холла), пьезоэлектрический, тензодатчик, виброэлемент, и потенциометрический тип датчика.

Емкостной датчик состоит из параллельных пластин-конденсаторов, соединенных с диафрагмой, которая обычно металлическая и подвергается давлению сил участвующих в процессе с одной стороны и опорным давлением на другой стороне. Электроды прикреплены к мембране и получают питание от генератора высокой частоты. Электроды ощущают любое перемещение диафрагмы, и это влияет на изменение емкости пластин-конденсаторов. Изменение емкости обнаруживается подсоединенной электрической цепью, которая выводит напряжение в соответствии с изменением давления. Данный тип датчика может работать в диапазоне от 2,5 Па – 70 МПа с чувствительностью 0,07 МПа.

Индуктивные датчики давления в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона. Ферромагнитный сердечник прикреплен к упругому элементу и имеет первичную и две вторичные обмотки. Ток подается на первичную обмотку. Когда сердечник по центру, то это же напряжение будет индуцироваться к двум вторичными обмотками. Когда сердечник перемещается под влиянием давления, отношение напряжения между двумя вторичными обмотками изменяется. Разность напряжений пропорциональна изменению давления. Такие датчики могут быть использованы с любым упругим элементом (хотя, как правило, используются в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона). Чтение значения создаваемого давления будет определяться калибровкой напряжения. Таким образом, диапазон давления, в котором может

быть использован этот датчик, определяется относительно упругого элемента, но лежит в диапазоне от 250 Па – 70 МПа.

Датчики давления, основанные на принципе магнетосопротивления, также имеют ферромагнитный сердечник. При изменении давления гибкий элемент перемещает ферромагнитную пластину, что приводит к изменению магнитного потока цепи, которое может быть измерено. Ситуации, в которых можно было бы использовать электрический элемент, это ситуации, в которых индуктивный датчик не генерирует достаточно точное измерение. Диапазон давления для данного метода составляет от 250 Па до 70 МПа с чувствительностью 0,35 МПа.

Пьезоэлектрические датчики используют датчик-кристалл. Когда давление прикладывается к кристаллу, он деформируется и создается небольшой электрический заряд. Изменение электрического заряда пропорционально изменению давления. Этот тип датчика имеет очень быстрое время отклика на постоянные изменения давления. Подобно датчику давления, основанного на принципе измерения магнетосопротивления, пьезоэлектрический элемент очень чувствителен, но реагирует гораздо быстрее. Таким образом, если время имеет существенное значение, пьезоэлектрический датчик будет приоритетным к использованию. Диапазон давления датчиков такого типа составляет 0,021 – 100 МПа с чувствительностью 0,1 МПа.

Потенциометрические датчики имеют рычаг, механически прикрепленный к упругому датчику давления. При изменении давления деформируется упругий элемент, в результате чего рычаг двигается вперед или назад по потенциометру и таким образом снимаются показания сопротивления. Эти чувствительные элементы принадлежат оптимальному рабочему диапазону, но ограничены многими факторами. Таким образом, они являются датчиками нижнего уровня, которые не используются слишком часто. При низкой чувствительности и рабочем диапазоне они могут лучше всего подойти в качестве дешевого детектора, давая грубую оценку. Диапазон давления 0,035 – 70 МПа с чувствительностью 0,07 – 0,35 МПа.

Тензометрический датчик обнаруживает изменения давления путем измерения изменения сопротивления мостовой схемы Уитстона. Эта схема используется для определения неизвестного электрического сопротивления, уравнивая две секции мостовой схемы, так, чтобы отношение сопротивлений в одной секции (R_3/R_2) было таким же, как и в другой секции (R_4/R_1), возвращая ноль в гальванометре в центральной ветви. Одна из секций содержит неизвестный компонент, сопротивление которого должно быть определено, тогда, как другая секция содержит резистор с известным сопротивлением, которое можно регулировать.

Тензодатчик помещает чувствительные элементы на каждом из резисторов и измеряет изменение сопротивления каждого резистора под действием изменения давления. Сопротивление определяется уравнением

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

где ρ – удельное сопротивление проводника;

L – длина проводника;

A – площадь поперечного сечения проводника.

Изменение давления будет либо удлинять, либо сжимать проводник, следовательно, датчик сжатия необходимо размещать на одном резисторе, а датчик удлинения – на другом. Чтобы контролировать воздействие температуры (проволока будет также либо удлиняться, либо сжиматься из-за изменения температуры), свободный датчик нужно разместить на остальных двух резисторах. Эти датчики часто являются одним из типов полупроводника (N-тип или p-тип). Таким образом, чувствительность таких датчиков значительно больше, чем чувствительность их металлических аналогов, однако с большей чувствительностью приходит более узкий функциональный диапазон: температура должна оставаться постоянной, чтобы получить действительное значение. Эти датчики сильно зависят от изменений темпе-

ратуры (в отличие от других типов электрических компонентов). Диапазон давления 0 – 1400 МПа с чувствительностью 1,4 – 3,5 МПа.

Вибрационные датчики давления функционируют посредством измерения изменения резонансной частоты вибрирующих элементов. Ток проходит через провод, индуцируя в нем электродвижущую силу. Затем усилие увеличивается, что вызывает колебание проволоки. Давление влияет на этот механизм; с помощью влияния на сам провод: повышение давления уменьшает напряжение в проводе и, таким образом снижает угловую частоту колебаний провода. При измерении абсолютных давлений датчик размещен в цилиндре под вакуумом. Эти датчики измерения абсолютного давления являются очень эффективными: они производят повторяемые результаты и слабо подвержены влиянию температуры. Им не хватает чувствительности в процессе измерения, поэтому они не очень подходят для процесса, в котором необходимо отслеживать кратковременные изменения давления. Диапазон давления: 0,0035 – 0,3 МПа.

Датчики дифференциального давления используются с различными видами датчиков, в которых измерение давления является результатом разности давлений, в частности, таких как диафрагмы, сопла подачи или Вентури-метры. Датчик перепада давления преобразует разность давлений в передаваемый сигнал. Размещение датчика перепада давления зависит от характера потока текучей среды, которая измеряется. Типичный датчик дифференциального давления минимально инвазивный (внешний компонент присоединен через точки измерения); он обычно используется с емкостным элементом в паре с диафрагмой, которая позволяет емкостному телу двигаться вместе или отдельно, генерируя сигнал (через изменение емкости), который может быть интерпретирован как падение давления. Датчики дифференциального давления часто используются для обнаружения небольших различий в больших перепадах давления.

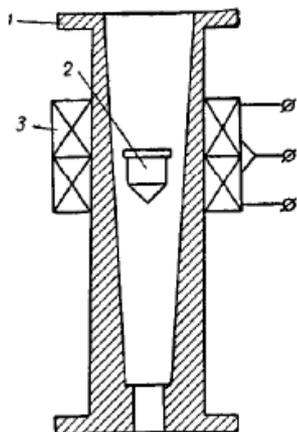
Диапазон измеряемого давления и чувствительность датчика дифференциального давления зависит от электрических и упругих компонентов, используемых в самом датчике.

Датчики расхода действуют по принципу возникновения перепада давления в сужающем устройстве. Перепад давления в этом случае является функцией расхода. Сужающее устройство считается воспринимающим органом датчика расхода. Датчики расхода постоянного перепада (ротаметры) используются для регулирования сечения с целью поддержания постоянным перепада давления. Датчики расхода бывают механическими, тепловыми, ионизационными, индукционными, акустическими.

Механические датчики расхода делятся на датчики переменного и неизменного перепада, также – датчики со сливным отверстием.

Датчики расхода переменного перепада действуют по принципу появления перепада давления в сужающем устройстве, которое устанавливается на пути передвигающейся среды. Перепад давления является функцией расхода. Сужающее устройство выступает в роли воспринимающего органа датчика расхода.

Датчики расхода неизменного перепада (ротаметры) употребляют сужающие органы для регулирования сечения с целью поддерживать неизменным перепад давления.



На рисунке приведена схема ротаметра с индуктивным датчиком. Ротаметр состоит из конической трубки 1 и поплавка 2. При движении воды либо газа в кольцевом зазоре между поплавком и стенками трубки возникает перепад давления, который создает силу, действующую навстречу силе веса поплавка. Положение поплавка в конической трубке определяется величиной расхода. Ротаметры производятся как показывающие приборы и как датчики. Обмотка индуктивного датчика помещена снаружи на трубке сопла. Металлический поплавок является сердечником катушки 3 индуктивного датчика. При изменении расхода поплавок перемещается и изменяет индуктивность катушки, при этом расход

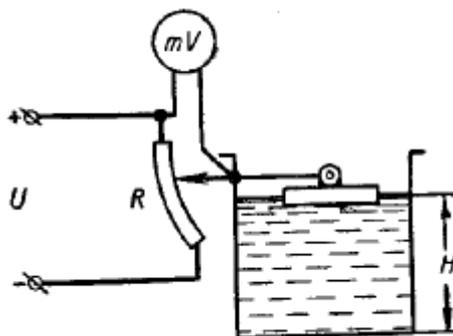
преобразуется в электронный сигнал.

Датчики уровня служат для контроля уровня жидкости в резервуарах и подачи сигналов о регулировании этого уровня.

Электродный датчик уровня используется для контроля уровня электропроводных жидкостей. Он имеет один короткий электрод и два длинных, которые укреплены в коробке зажимов. Короткий электрод является контактом верхнего уровня воды, а длинный – нижнего уровня. Датчик соединяется проводами со станцией управления движком насоса. Когда вода касается недлинного электрода, это приводит к отключению пускателя насоса. Понижение уровня воды, когда он становится ниже длинного электрода, дает команду на включение насоса.

Очень распространенными являются *поплавковые датчики*. Поплавковый датчик состоит из поплавка – органа, воспринимающего уровень воды, промежуточного органа – механической связи, модифицирующей и передающей механическое воздействие выходному органу, представляющему собой датчик перемещения.

Датчики уровня могут быть основаны на измерении веса и гидростатического давления жидкости, на использовании электронных параметров жидкости (конфигурации сопротивления, емкости, индуктивности).



На рисунке приведена схема поплавкового датчика уровня с реостатным датчиком R на выходе. По свидетельствам милливольтметра mV судят об уровне жидкости H в сосуде.

Для определения уровня сыпучих материалов в бункерах употребляются *мембранные датчики* уровня, которые крепятся в отверстиях стены бункера. Мембрана датчика прогибается под воздействием давления сыпучего материала, и ее деформация передается через шток на микропереключатель, управляющий электрической цепью.

В основе действия *гидростатических датчиков* уровня лежит закон пропорциональности между высотой столба жидкости и гидростатическим давлением этого столба:

$$P = \rho g h,$$

где P – гидростатическое давление столба жидкости,

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения,

ρ – плотность жидкости.

Существует три основных типа гидростатических уровнемеров – погружные, врезные и фланцевые, выделяемые по типу включения в процесс. Так же, так как этот фактор обуславливает специальные требования к материалам, из которых изготовлен прибор, имеет смысл выделять гидростатические уровнемеры по типу измеряемых сред: неагрессивная к нержавеющей стали, агрессивная к нержавеющей стали, пульпообразная, густая и абразивная среды. При выборе метода измерения уровня следует учитывать, что корректные измерения гидростатическими датчиками возможны только в средах с постоянной плотностью, так как гидростатическое давление зависит от плотности жидкости и величины уровня. При необходимости решения задачи измерения уровня в средах с меняющейся плотностью возможна установка двух датчиков уровня. Один прибор устанавливается в емкость для отбора пробы. В емкости обеспечивается постоянный уровень, и уровнемер измеряет плотность, а данные со второго (собственно уровнемера) пересчитываются в контроллере с учетом текущей плотности среды, с которого уже скорректированный сигнал поступает в верхний уровень. Гид-

ростатические датчики уровня – датчики избыточного давления, которым необходима связь сенсора с атмосферой. У датчиков избыточного давления измеряемая среда (P_{cp}) и атмосферное давление в баке ($P_{атм\ бак}$) действуют с одной стороны чувствительного элемента и только атмосферное давление ($P_{атм}$) – с другой. Для открытых емкостей, $P_{атм} = P_{атм\ бак}$. Таким образом, атмосферное давление в баке компенсируется атмосферным давлением вне его, и датчик измеряет только давление среды. Для измерения уровня в полностью закрытых емкостях, где создается избыточное давление ($P_{изб.}$) между крышкой емкости и жидкостью, наиболее оптимальным будет применение гидростатических датчиков дифференциального давления. В этом случае с помощью специального капилляра необходимо связывать датчик дифференциального давления с областью избыточного давления емкости.

Датчик плотности (плотномер) – это измерительный прибор, служащий для измерения плотности газов, жидкостей, твердых веществ. Для выбора соответствующего плотномера рассматриваются основные метрологические, а также эксплуатационные характеристики. К ним относятся: точность, воспроизводимость, пределы измерения, их погрешности и диапазон, температуры действия и давления, определение взаимодействия конструкционных материалов и исследуемых веществ. Стандартной температурой считается 0 °С, такая температура позволяет произвести измерения при помощи плотномера. На основании относительной плотности веществ при этой температуре составляются таблицы (номограммы), выступающие в качестве справочных данных.

Для жидкостей используются автоматические и ручные плотномеры, которые подразделяются по принципу действия.

Поплавковые, или ареометрические, плотномеры разработаны на основе закона Архимеда, согласно которому масса жидкости, вытесненная плавающим аэрометром, равна его массе. Такие приборы имеют погрешность 0,2 – 2% от диапазона показаний плотности, охватываемого шкалой прибора. Поплавковые плотномеры подразделяются на плавающие и погруженные в жидкость.

Плотномер с плавающим поплавком для жидкости состоит из основного сосуда, переливного сосуда, поплавок, сердечника, катушки, входной трубы, подводящей грубы, отводящей трубы, термометра сопротивления, вторичного прибора, индукционного моста.

Плотномер с погруженным поплавком для жидкостей включает в себя камеру, поплавок, уплотнительный сифон, противовес, коромысло, ролик, рычаг, мембранную коробку, заслонку, сопло, вторичный прибор. Эти типы приборов имеют отличительные особенности. Для одного отношение глубины его погружения обратно пропорционально плотности применяемой жидкости, в другом случае плотность прямо пропорциональна массе поплавка. Также поплавок используются для определения плотности газов. Конструкция поплавок плотномера для газов включает в себя камеру, герметичный и открытые шары, коромысло, устройство для балансировки и регулирования чувствительности коромысла, груз, мембранную коробку, фильтры, постоянный магнит, стрелку прибора. Измерения осуществляются в результате постоянного взвешивания шара с азотом в камере, которая заполняется исследуемым газом. Мера плотности определяется относительно угла наклона коромысла, движение которого, взаимодействуя с магнитом, переходит к стрелке прибора.

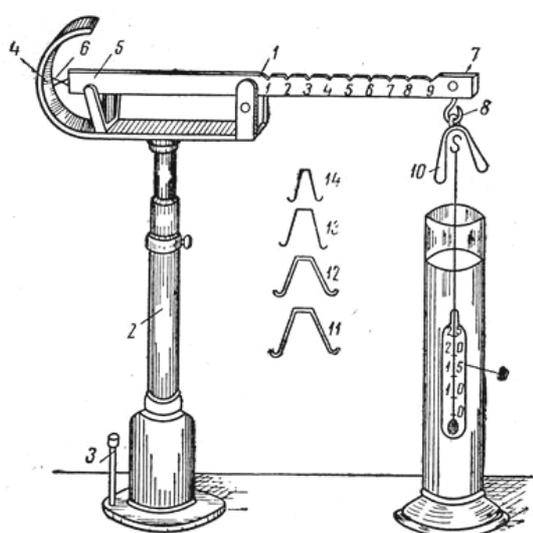
Массовые плотномеры созданы на принципе постоянного взвешивания определенных объемов жидкости, погрешность прибора составляет 0,5 – 1%. Их конструкция основана на принципе пропорциональности плотности и массы жидкости постоянному объему. Массовый плотномер состоит из U-образной трубки, тяги, соединительных патрубков, рычага, противовеса, сильфона, трубки для подачи воздуха, заслонки и сопла. Такие плотномеры оснащаются пневматическим преобразователем. Жидкость определенного объема, протекающая по трубопроводу, непрерывно взвешивается. Массовые плотномеры измеряют плотность суспензий, вязких жидкостей и жидкостей, в состав которых входят твердые включения.

Гидростатические плотномеры позволяют измерять давление столба жидкости неизменной высоты, погрешность соответствует 4%. Гидростатический плотномер, измеряющий плотность газов, работает на принципе сравнения давления столба исследуемого и эталонно-

го газов, имеющих равную высоту. Такой плотномер состоит из трубки, дифманометра и термостата. Дифманометр фиксирует перепад давлений, который пропорционален плотности проверяемого газа.

Конструкции плотномеров, используемых для гидростатического взвешивания, базируются на принципе закона Архимеда и определяют плотность жидкостей и твердых тел. Для измерения плотности жидкости применяется какое-либо тело с определенной массой и объемом (в основном стеклянный поплавок, который взвешивается в этой жидкости).

Для измерения плотности твердого тела необходимо произвести его двукратное взвешивание. Первое взвешивание производится в воздухе и позволяет определить массу тела. Следующее взвешивание осуществляется в жидкости, плотность которой известна (чаще всего для этих целей используется дистиллированная вода). Разница, определенная из результатов обоих взвешиваний, определяет объем твердого тела. Гидростатическое взвешивание на технических, аналитических, образцовых весах дает разную степень точности. Массовые измерения, как правило, осуществляются на быстродействующих весах, но менее точных, к ним относятся весы Мора, весы Вестфала, или используется их комбинация.



Конструкция гидростатических весов Вестфала – Мора включает в себя неравноплечное коромысло 1 с висющим на его конце поплавком, иногда снабженным термометром; и неподвижного штатива 2, имеющего внизу регулировочный винт 3, а сверху – неподвижное острие 4. Коромысло состоит из двух частей или плеч: одно из них более короткое и широкое (5), другое более длинное и тонкое (7), разделенное на 10 делений, к последнему делению которого на тонкой платиновой нити подвешен стеклянный поплавок 9. Вес поплавка подобран таким, чтобы он точно уравнивал коромысло в воздухе. Прибор снабжен пятью разновесами 10 – 14. Каждый из двух больших имеет вес, точно равный весу воды

при температуре 20 °С, вытесняемой поплавком. Вес трех малых разновесов в 10, 100, 1000 раз меньше веса большого разновеса. При погружении поплавка в испытываемую жидкость равновесие, установленное в воздухе, нарушается, и его восстанавливают навешиванием разновесов на плечо с подвешенным поплавком. Пользуясь весами Вестфала-Мора, можно определять плотности как менее, так и более единицы.

Радиоизотопные плотномеры работают на принципе нахождения ослабления пучка γ -излучения, полученного при его поглощении или рассеянии слоем жидкости. Погрешность этого прибора составляет примерно 2%. Принцип действия радиоизотопного плотномера основан на изменении интенсивности ионизирующих излучений в результате их прохождения сквозь рассматриваемую среду. Состоит радиоизотопный плотномер из основного источника излучения и дополнительного источника излучения, сосуда с жидкостью, основного приемника излучения и дополнительного приемника излучения, электронного усилителя, основного электронного преобразователя и дополнительного электронного преобразователя, компенсирующего клина, реверсивного электродвигателя, индуктивного передатчика, вторичного прибора. Плотность среды находится в функциональной зависимости от характера излучений, их ослабления. В таких плотномерах главным образом используется γ -излучение.

Вибрационный плотномер разработан на принципе зависимости резонансной частоты колебаний, которые возбуждаются в жидкости, относительно ее плотности, погрешность прибора составляют $(1-2) \cdot 10^{-4}$ г/см³. Вибрационные плотномеры оснащаются чувствительным элементом, разработанным в виде металлической трубки, внутренняя часть которой в обязательном порядке подвергается полированию. Чувствительный элемент устанавливается в потоке исследуемого вещества с помощью электронного устройства, предусмотренного в

конструкции трубки, в потоке происходит осциллирование трубкой, частота собственных колебаний трубки обуславливается плотностью вещества.

Ультразвуковые плотномеры созданы на основе зависимости скорости звука в среде относительно плотности среды, погрешность этих приборов – в пределах 5%.

Технологические плотномеры являются измерительными приборами автоматического типа, применяются для непрерывного определения и регулирования плотности веществ, которые находятся в процессе своего производства или переработки. Устанавливаются эти приборы в контрольных точках технологических линий и на аппаратах промышленных установок. Такие типы плотномеров разрабатываются в виде датчиков, вторичных приборов, блоков подготовки пробы и т. д.

Лабораторные плотномеры используются в качестве ручного периодического измерения относительной плотности веществ, в основном это ареометры, пикнометры и гидростатические весы.

Ареометры подразделяются на приборы постоянной массы, которые применяются в большинстве случаев, и постоянного объема. Ареометры постоянной массы состоят из шкалы плотности, балласта или дроби, связующей массы, встроенного термометра. Ареометры постоянного объема имеют: балласт или дробь, связующую массу, тарелку для гирь, метку.

Денсиметры являются ареометрами постоянной массы, шкала градуируется в единицах плотности. К этому типу плотномеров относятся приборы, определяющие концентрацию растворов. Шкала для них градуируется в процентах по объему или по массе. Эти приборы называются лактометрами (измеряют жирность молока), спиртомерами (определяют содержание спирта в воде), сахарометрами (позволяют определять содержание сахара в сиропах) и т. д. Плотность постоянного объема измеряется при помощи изменения массы поплавка при достижении определенной метки в результате погружения поплавка. Также этот тип ареометра позволяет определить плотность твердых тел.

Плотность принадлежит к числу наиболее распространенных показателей, применяемых при исследовании нефти и нефтепродуктов. Особое значение этот показатель имеет при расчете веса нефтепродуктов, занимающих определенный объем. Это очень важно при конструктивно-расчетных исследованиях и для практической работы на местах производства, транспортировки и потребления нефти.

Для определения плотности жидких и твердых нефтепродуктов в нефтяной практике применяют такие способы, как ареометрический; взвешивание на весах Вестфалья-Мора; пикнометрический; метод взвешенных капель; метод гидростатического взвешивания.

Выходные сигналы датчиков и других элементов, как правило, очень слабы и не могут использоваться непосредственно для приведения в действие элементов систем автоматики. Выходная мощность датчиков в большинстве случаев составляет сотые, тысячные доли ватта, тогда как мощность, необходимая для управляющего органа, может достигать десятков и даже сотен киловатт. Поэтому в современных автоматических системах управления широко применяют усилительные элементы (усилители), которые нередко наряду с основным назначением усиливать мощность сигнала выполняют и функцию его преобразования в вид, более удобный для работы системы.

Усилителем называется устройство, предназначенное для увеличения мощности сигнала за счет энергии дополнительного источника питания, при этом выходная (усиленная) величина является функцией входного сигнала и имеет одинаковую с ним физическую природу.

Усилители различают по выходной мощности, виду подводимой вспомогательной энергии, коэффициенту усиления, принципу действия, по форме характеристики, выражающей зависимость между выходной и входной величинами, и по ряду иных признаков.

Для достижения таких значений необходимо включить последовательно несколько усилителей автоматики.

Единицы измерения входных и выходных сигналов усилителей одинаковы. Ими могут быть единицы мощности (Вт, кВт), напряжения (В), тока (А), скорости (м/с), давления (Па),

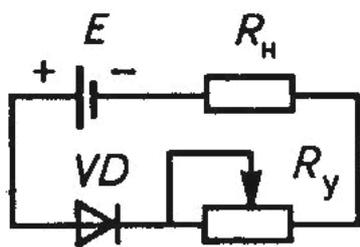
силы (Н) и т.д. Соответственно единицам измерения величин коэффициент усиления может быть назван коэффициентом усиления по току, напряжению, давлению, но основным считают коэффициент усиления по мощности. В зависимости от принципа действия и конструкции усилителя коэффициент усиления по мощности может составлять от 1 до 10^7 .

Усилению могут подвергаться не только электрические параметры, но и другие входные величины (перемещение, скорость, ускорение, давление и т. п.). Усилительный элемент совместно с резисторами, конденсаторами и другими элементами схемы называют *усилительным каскадом*. Если усиления сигнала одним каскадом недостаточно, применяют соединение нескольких каскадов, выполняющих роль предварительного усиления и обеспечивающих работу мощного выходного каскада. Поэтому различают однокаскадные и многокаскадные усилители. При этом в многокаскадном усилителе первый каскад от входа называется входным, а последний – выходным.

Электронные усилители широко применяются в системах автоматики для предварительного усиления сигналов, получаемых от датчиков. Предварительная выходная мощность усилителей не превышает 100 Вт. К ним относятся усилители постоянного и переменного тока: ламповые, полупроводниковые, операционные, электромашинные, электромеханические и магнитные.

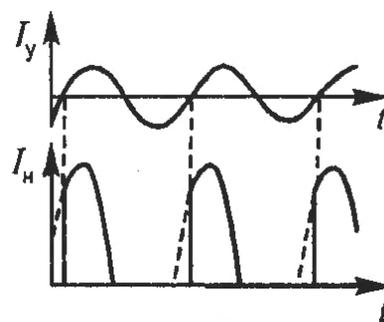
Полупроводниковые усилители характеризуются незначительной мощностью потребления, достаточной надежностью, высоким быстродействием, сравнительно большим коэффициентом усиления, малыми размерами, и поэтому вытеснили ламповые усилители из многих сфер применения. Они могут работать на постоянном и переменном токе. По способу включения полупроводниковых триодов эти усилители делятся на три основных вида: с общей базой, с общим коллектором и с общим эмиттером.

В качестве основного усиливающего элемента *тиристорного усилителя* используется



тиристор, который в зависимости от числа выводов и назначения называется динистором, тринистором и семистором. Схема включения тиристоров приведена на рисунке. Динистор – это тиристор с двумя выводами. Для его включения необходимо, чтобы напряжение на нем превысило так называемое напряжение включения. Отключение динисторов происходит при снятии напряжения питания или уменьшении тока нагрузки до уровня тока выключения.

Тринистор – это тиристор с тремя выводами. Он включается при подаче напряжения включения или тока управления I_v на специальный управляющий электрод. Тринистор включается током управления I_v , сдвинутым по фазе относительно тока нагрузки I_n , с помощью специального фазосдвигающего устройства. Отключение тринистора происходит при изменении полярности его напряжения питания или уменьшении тока нагрузки I_n до значения тока выключения. При питании тринистора переменным током напряжение питания в течение каждого полупериода проходит через нуль, что создает естественные условия для отключения тиристора.



Семистор – это тиристор с четырьмя выводами. В нем предусмотрена возможность управления переключением цепи переменного тока в течение положительного и отрицательного полупериодов переменного напряжения.

Магнитный усилитель представляет собой электромагнитный аппарат, принцип действия которого основан на зависимости магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника с катушкой переменного тока от подмагничивающего действия постоянного тока.

Чем больше постоянный ток в обмотке управления, тем сильнее магнитный поток, создаваемый обмоткой управления, и, следовательно, тем выше насыщение сердечника. При

этом магнитная проницаемость сердечника уменьшается, что приводит к снижению индуктивности рабочих обмоток, падению их реактивного сопротивления и увеличению тока нагрузки. Таким образом, незначительные изменения постоянного тока управления в подмагничивающей обмотке вызывают весьма существенные изменения переменного тока в рабочей обмотке. В этом и заключается эффект усиления магнитного усилителя. Характеристика магнитного усилителя – зависимость тока нагрузки от подмагничивающего постоянного тока.

Преимущества магнитных усилителей: простое устройство, высокие коэффициент усиления, КПД, надежность и большой срок службы, отсутствие подвижных частей, нечувствительность к температуре, ударам и вибрационным нагрузкам. К недостаткам усилителей относятся большие габаритные размеры, масса и инерционность. Они применимы только для усиления низкочастотных сигналов.

Гидравлические и пневматические усилители применяют в автоматических системах для усиления сигналов по мощности. Принципиальные схемы таких усилителей практически не отличаются одна от другой. Если в гидравлических усилителях перемещение исполнительного органа происходит под действием жидкости, поступающей от специального насоса, то в пневматических рабочей средой является воздух, нагнетаемый специальным компрессором. Различают два класса гидравлических усилителей: дроссельные и струйные.

В системах автоматического контроля и регулирования технологических процессов термической обработки первичные приборы (датчики) используются в комплекте с вторичными измерительными, самопишущими и регулирующими приборами (милливольтметры, логометры, электронные приборы). Наиболее совершенными и распространенными вторичными приборами являются автоматические электронные приборы.

Промышленностью выпускается большое количество различных типов вторичных электронных приборов и их модификаций, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- по функциональному назначению:
 - показывающие;
 - показывающие и регулирующие;
 - показывающие и самопишущие (регистрирующие);
 - показывающие, самопишущие и регулирующие;
- по конструктивным характеристикам:
 - приборы нормального габарита (длина шкалы до 280 мм);
 - малогабаритные (длина шкалы 150 – 210 мм);
 - миниатюрные (длина шкалы 100 – 120 мм);
 - приборы с диаграммной бумагой в виде ленты;
 - приборы с диаграммной бумагой в виде диска;
- по типу измерительной схемы:
 - потенциометры;
 - уравновешенные мосты;
 - приборы с дифференциально-трансформаторными или ферродинамическими преобразователями;
- по классу точности:
 - прецизионные (класс точности 0,25 и выше);
 - средней точности (классы точности 0,5 и 1,0);
 - низкой точности (класс точности 1,5 и ниже);
- по времени прохождения указателем всей шкалы:
 - быстродействующие (0,25 – 0,5 с);
 - среднего быстродействия (1 – 10 с);
 - низкого быстродействия (более 10 с).

Вторичные приборы, обеспечивающие регулирование измеряемого параметра, классифицируют также по типу регулирующего устройства.

В настоящее время выпускают автоматические электронные приборы серии К (КП – показывающие, КВ – показывающие с вращающейся шкалой и КС – самопишущие), имеющие следующие обозначения: КПП, КВП, КСП – потенциометры; КПМ, КВМ, КСМ – уравновешенные мосты; КСД – приборы с дифференциально-трансформаторным преобразователем; КСФ – приборы с ферро-динамическим преобразователем; КПУ, КВУ, КСУ – приборы унифицированного электрического сигнала.

Исполнительные элементы устанавливаются на выходе (в конце основной цепи воздействия) автоматических устройств для воздействия на управляющие (регулирующие) органы управляемого процесса или объекта. При этом в ряде случаев в исполнительных элементах осуществляется преобразование энергии, получаемой от предыдущих элементов автоматического устройства, в вид, удобный для воздействия на органы управления объекта, а также усиление поступающего сигнала.

Для работы регулирующих органов требуются механические импульсы (например, для замыкания и размыкания контактов, для перемещения клапана и т.д.). Поэтому в составе исполнительных элементов часто имеются *серводвигатели* (усилители с перемещающимся выходным звеном).

Исполнительные устройства автоматики по принципу действия подразделяются на электрические, гидравлические и пневматические и служат для воздействия на регулирующие органы в соответствии с сигналом управления.

Электрические исполнительные устройства – это устройства, преобразующие электрический ток в механические перемещения. К таким устройствам относятся электродвигатели переменного и постоянного тока и шаговые (импульсные), а также электромагнитные устройства – электромагнитные муфты, электромагнитные вентили, электромагниты с поворотным якорем и т.п.

Наибольшее распространение получили электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронные двигатели (переменного тока) с короткозамкнутым ротором, которые по своим эксплуатационным качествам превосходят двигатели постоянного тока. Тем не менее, двигатели постоянного тока, обладая высокими пускорегулирующими свойствами, находят широкое применение в специальных системах автоматики.

Из маломощных асинхронных двигателей переменного тока используют двухфазные, а из более мощных – трехфазные.

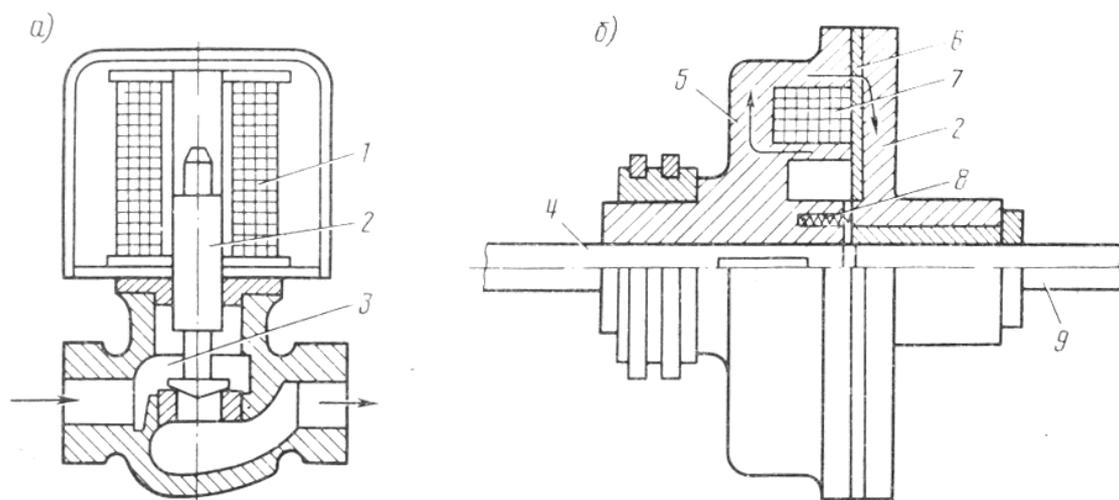
Двухфазные асинхронные исполнительные двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором и с ротором в виде тонкостенного полого цилиндра. Последние отличаются малым моментом инерции и применяются в быстродействующих исполнительных устройствах.

Реже в качестве исполнительных устройств применяют трехфазные асинхронные двигатели. Управление ими осуществляется изменением напряжения питания или частоты.

Шаговые электродвигатели используются в тех автоматических устройствах, где управляющий сигнал задается в цифровой форме или в виде последовательных импульсов. Автоматизированный привод дискретного действия с шаговыми двигателями достаточно прост, надежен и имеет малые габариты. Шаговые двигатели применяют в различного рода счетчиках, затворах, лентопротяжных механизмах и т.д.

Электромагниты предназначены для выполнения быстрых перемещений рабочего органа на небольшие расстояния и, в основном, для управления гидравлическими или пневматическими вентилями, кранами, задвижками, золотниками.

В зависимости от величины хода якоря электромагниты могут быть длинноходовыми и короткоходовыми. Один из видов исполнительного устройства – простой *электромагнитный вентиль* (соленоидное исполнительное устройство) – приводит в действие клапан, открывающий и закрывающий доступ рабочей жидкости или сжатого воздуха в привод машины (рис. а). При прохождении в катушке 1 электрического тока стальной якорь 2 втягивается внутрь соленоида и открывает клапан 3.



На принципе электромагнитного притяжения основаны устройство и действие *электромагнитных муфт* (рис. б), получивших широкое применение в автоматизированных станках и других машинах, где при их помощи производятся различные переключения в кинематических цепях без прерывания движения. На ведущем валу 4 жестко закреплен корпус 5 электромагнита. Якорь 2 расположен на ведомом валу 9. Между корпусом 5 и якорем 2 помещен фрикционный диск 6. В корпусе 5 находится катушка 7, которая питается постоянным током через контактные кольца и щетки. При прохождении через обмотку катушки электрического тока в корпусе возникает магнитный поток, пронизывающий фрикционный диск и замыкающийся через якорь. Якорь притягивается к корпусу, и движение ведущего вала 4 передается ведомому валу 9. При прекращении подачи тока в катушке пружина 8 отталкивает якорь 2 от корпуса 5 и движение ведомого вала прекращается.

Применение электромагнитных муфт дает возможность разделить пуск электродвигателей и рабочих механизмов, устранить удары как в электродвигателях, так и в механических передачах, обеспечить плавность разгона и снять перегрузки. Несмотря на значительно более низкий КПД по сравнению с электродвигателями, оснащенными тиристорными преобразователями, область применения электромагнитных муфт весьма широка: от прецизионных приборных следящих систем до мощных регулируемых приводов.

Электромагнитные исполнительные элементы служат для выполнения простых операций управления (включать – выключать, открывать – закрывать). Более сложные функции исполнительного блока выполняют электрическими, гидравлическими и пневматическими двигателями.

К гидравлическим исполнительным устройствам относятся, прежде всего, гидравлические двигатели с поступательным или вращательным движением. Первый вид – двигатели поршневые и мембранные, второй – ротационные (лопастные и поршневые). Чаще других в качестве исполнительных механизмов используются поршневые гидродвигатели поступательного движения. Основной частью такого двигателя служит гидроцилиндр с поршнем, закрепленным на штоке, который в свою очередь жестко соединяется с рабочим органом машины.

Пневматические исполнительные механизмы – это устройства, в основном, поршневые и мембранные, по своей конструкции аналогичны гидравлическим, и применяются для приведения в действие дроссельных клапанов, зажимных приспособлений, тормозных колодок и т.п. Пневматические устройства дешевле гидравлических, более просты в изготовлении и эксплуатации. Они не требуют высокого качества уплотнений, не реагируют на изменение температуры и имеют более простые пусковые приспособления. Однако при больших рабочих усилиях пневматические устройства должны иметь значительные габаритные размеры. Кроме того, такие устройства не могут обеспечить высокой точности перемещений и плавности подачи.

Шаговые двигатели используются в электроприводе с дискретным перемещением рабочих органов – узлов роботов, затворов, устройств надвигания станков, а также в электроприводе, где управляющий сигнал задается в виде последовательности кодовых импульсов в системах числового программного управления оборудованием.

Требуемое быстродействие, точность, устойчивость в заданном диапазоне частот и величина шага обеспечиваются выбором типа шагового привода, который выпускается с широким диапазоном параметров.

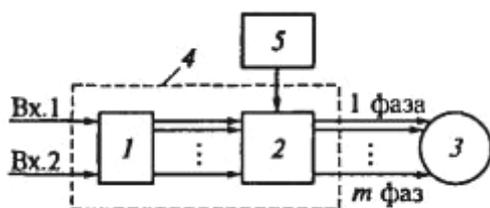
Шаговые двигатели бывают с кинематической связью между ротором и статором (храповые устройства), они имеют невысокое быстродействие и малый срок службы и поэтому применяются редко.

Шаговые двигатели с электромагнитной связью между ротором и статором – синхронные электродвигатели. Эти двигатели относятся к системам частотного регулирования синхронного электродвигателя с широким диапазоном изменения скорости. В шаговом двигателе обмотки возбуждаются, питаются прямоугольными или ступенчатыми импульсами напряжения с изменяющейся частотой, что обеспечивает дискретное вращение электромагнитного поля и вращение ротора в виде дискретной последовательности элементарных угловых перемещений.

Шаговые двигатели с электронным коммутатором осуществляют преобразование унитарного кода управления в угол поворота вала, каждому импульсу управления соответствует поворот вала на фиксированный угол. Скорость вращения и суммарный угол поворота вала пропорциональны, соответственно, частоте и числу импульсов управления.

Таким образом, дискретный привод с шаговым двигателем является синхронным следящим приводом, сочетающим в себе возможности глубокого частотного регулирования скорости вращения до нуля и числового заданного перемещения.

Схема управления шагового двигателя (3) состоит из электронного коммутатора 1, который имеет m выходных усилителей, равных числу фаз силовых усилителей 2, и источника постоянного тока 5. Схемы электронных коммутаторов определяются числом управляющих обмоток. Шаговые двигатели обычно используют реверсивный счетчик. Электронный коммутатор имеет два выхода для обеспечения реверса шагового двигателя. Сигналы на вход коммутатора поступают от программирующего устройства 4, в частности, – от микропроцессорной системы управления.



Основы цифровой техники

В повседневной жизни мы обычно пользуемся десятичной системой счисления. Это позиционная система счисления, которая имеет 10 арабских цифр от 0 до 9 и, следовательно, основание 10.

В ЭВМ применяется двоичная система счисления, т.е. все числа в компьютере представляются с помощью нулей и единиц, поэтому компьютер может обрабатывать только информацию, представленную в цифровой форме. Цифровые системы оперируют двумя значениями сигнала – логические 0 и 1. Следовательно, для математического представления значений дискретных переменных в цифровых системах используется двоичная система счисления – позиционная система счисления, которая имеет 2 арабских цифры 0 и 1 и, следовательно, основание 2.

Для преобразования числовой, текстовой, графической, звуковой информации в цифровую необходимо применить кодирование. **Кодирование** – это преобразование данных одного типа через данные другого типа. В ЭВМ применяется система двоичного кодирования, основанная на представлении данных последовательностью двух знаков: 1 и 0, которые называются двоичными цифрами (*binary digit* – сокращенно bit). Для перевода числа из десяти-

точной системы счисления в двоичную можно воспользоваться делением десятичного числа на основание 2 и записывать остатки от деления в обратном порядке.

Таким образом, единицей информации в компьютере является один бит, т.е. двоичный разряд, который может принимать значение 0 или 1. Восемь последовательных бит составляют байт. В одном байте можно закодировать значение одного символа из 256 возможных ($256 = 2^8$). Более крупной единицей информации является килобайт (Кбайт), равный 1024 байтам ($1024 = 2^{10}$). Еще более крупные единицы измерения данных: мегабайт, гигабайт, терабайт (1 Мбайт = 1024 Кбайт; 1 Гбайт = 1024 Мбайт; 1 Тбайт = 1024 Гбайт).

Целые числа кодируются двоичным кодом довольно просто (путем деления числа на два). Для кодирования нечисловой информации используется следующий алгоритм: все возможные значения кодируемой информации нумеруются и эти номера кодируются с помощью двоичного кода.

МикроЭВМ оперируют значительно меньшим числом команд, чем большие ЭВМ, но все равно оно достигает нескольких десятков и для их записи в двоичном коде требуется не менее шести разрядов. Так как адресуемый объем постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) обычно составляет несколько десятков тысяч, чаще всего слов, адресная часть команды должна содержать разрядов, т. е. полная «длина» команды должна быть порядка разрядов, что при обычной «длине» ячеек памяти микроЭВМ, составляющей разрядов, требует трех ячеек памяти ПЗУ. Это одна из особенностей мини-ЭВМ и микроЭВМ, усложняющая программирование и снижающая результирующее быстродействие их, которое обычно не превышает 150-200 тыс. операций типа сложения в 1 с.

МикроЭВМ обычно оперирует одноадресной системой команд, при которой адресная часть команды имеет только один адрес – адрес операнда, который необходимо передать в арифметико-логическое устройство (АЛУ). Другой операнд всегда находится в аккумуляторе; результат действия АЛУ над двумя операндами всегда остается в аккумуляторе.

Команды бывают нескольких типов:

- команды пересылок, например, «передать данные из ОЗУ (оперативно-запоминающее устройство) в АЦП (см. ниже)»;
- команды арифметических операций, например, «сложить» или «вычсть»;
- команды логических операций, например, «сравнить два числа»;
- команды перехода «перейти», «вызвать», «возвратить»;
- специальные команды, например, «останов».

Полный список команд, которыми оперирует микроЭВМ, дается в сопроводительной документации на ЭВМ.

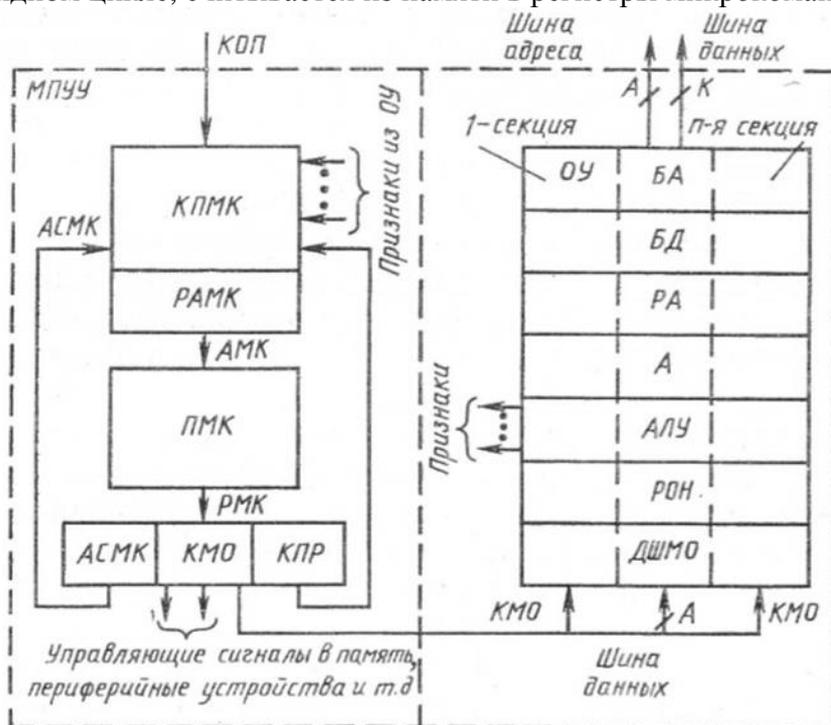
В общей сложности в программе может быть много тысяч команд, которые необходимо составить и обработать, а затем записать в ПЗУ.

Структурная схема типового секционного **микропроцессорного модуля** (МП) показана на рисунке ниже.

МП состоит из двух функциональных модулей: микропрограммного устройства управления (МПУУ) и операционного устройства (ОУ), построенного из отдельных секций. МПУУ включает в себя: память микрокоманд (ПМК), которая предназначена для хранения принимаемых команд; контроллер последовательности микрокоманд (КПМК), основным назначением которого является реализация управляющих структур (фрагментов), встречающихся в микрокомандах. Таким образом, контроллер обеспечивает дешифрацию кода операции команды для обращения к первой микрокоманде микропрограммы, формирует адреса следующих микрокоманд, как линейной последовательности, так и условных или безусловных переходов к микропрограмме. Кроме того, некоторые контроллеры могут хранить признак переходов, управлять прерываниями на микропрограммном уровне. Как правило, в комплект микропроцессора входят модули контроллеров последовательности микрокоманд для организации управления в различных режимах.

МПУУ работает следующим образом. Код операции (КОП) с регистра команд поступает на вход контроллера последовательности микрокоманд (КПМК), и на выходе регистра ад-

ресы микрокоманды (РАМК) контроллера формируется адрес первой микрокоманды (АМК) выполняемой микропрограммы. Микрокоманда, подлежащая реализации в текущем микрокомандном цикле, считывается из памяти в регистры микрокоманд (РМК).



Микрокоманда содержит три основных поля, содержание которых хранится в соответствующих узлах:

- 1) поле кода микрооперации (КМО), определяющее вид операции, выполняемой одним из устройств микро-ЭВМ;
- 2) поле, в котором закодированы признаки результата (КПР), поступающие из ОУ в контроллер и анализируемые контроллером при выполнении команд условного перехода по данным признакам условия;
- 3) поле, в котором содержится код адреса для формирования адреса следующей команды (АСМК). После выполнения считанной микрокоманды цикл повторяется. Управляющие сигналы микрокоманд подаются в соответствующие устройства микроЭВМ.

Операционное устройство предназначено для выполнения всех арифметических и логических операций. ОУ собирают из секций процессорных элементов, каждый из которых содержит АЛУ, регистры общего назначения (РОН), аккумулятор (А) – накапливающий регистр, дешифратор микрооперации (ДШМО), буфер данных (БД) и буфер адреса (БА), позволяющие временно хранить адрес (А) и данные (Д).

Одной из особенностей ОУ является вертикальное разбиение, что требует меньшего числа передач кодов между отдельными БИС. Шины данных, шины адреса и кода микроопераций объединяются в общую магистраль. Основными достоинствами секционных МП являются возможность разработки микроЭВМ с максимальным соответствием структуре характеризуемых задач, исключение избыточности структуры и разрядов, выбор произвольной нестандартной разрядности. Наличие независимых адресных шин и шин входных и выходных данных (шины адресов и данных могут быть различных форматов) позволяет организовать сопряжение с памятью и периферийными устройствами без использования мультиплексирования.

Программируемые логические микроконтроллеры (ПЛМК) в основном ориентированы на реализацию логических функций и используются вместо релейных схем управления, т.е. для управления полупроводниковыми схемами электроавтоматических устройств технологических объектов.

ПЛМК реализуют функции командоаппаратов и микроконтроллеров и создаются на базе микроЭВМ. Данные микроЭВМ можно рассматривать как универсальную программно-настраиваемую модель цифрового управляющего автомата. Возможность применения ПЛМК в качестве универсального локального устройства управления разными технологическими процессами достигается путем внесения в ПЛМК программы, определяющей алгоритм работы конкретного объекта управления без изменения его электрической структуры. В состав ПЛМК, как минимум, входят логический микропроцессор с блоком управления, оперативная память, панель настройки и загрузки управляющей программы и устройство связи с объектом управления.

Центральный логический процессор (ЦЛП) обеспечивает логическую обработку поступающей информации в соответствии с записанной программой в памяти программы и моделирует конкретную релейную схему. Устройство управления логического процессора опрашивает все входы и выходы блока регистров, производит логическое сравнение состояния входов и выходов и по результатам сравнения включает или выключает те или иные исполнительные органы через схему устройства связи с объектом управления. Микроконтроллер с помощью программного таймера и счетчика последовательно, строка за строкой, опрашивает (сканирует) память программ и с помощью ЦЛП производит вычисления логических функций согласно уравнениям, поступающим из памяти программ, и заносит вычисленные значения в память данных. После того, как опрос памяти окончился, устройство управления микроконтроллера выполняет обмен данными между входными и выходными регистрами блока регистров и памятью данных. Затем опрос памяти программ повторяется от начала до конца.

Таким образом, опрос памяти программ и обмен данными периодически повторяется в процессе управления. Однократный проход логического процессора по всей программе называют *циклом полного опроса* (сканирование) памяти, а время, в течение которого этот цикл исполняется, *временем цикла*. Оно характеризует быстродействие микроконтроллера.

Программируемые логические микроконтроллеры реализуют относительно простые функции управления и обладают рядом важных особенностей. Первая из них заключается в том, что циклы непрерывно повторяются в режиме управления объектом. Циклы состоят из отдельных фраз следующего содержания: «фотографирования» состояния узлов объекта (опрос выходов), переработки данных совместно с данными новой фразы и выдачи управляющих сигналов на исполнительные органы. «Фотографирование» состояния объекта управления в данный момент времени реализуется вводом в соответствующие ячейки памяти сигналов опроса состояния объекта (получение ответов от соответствующих аппаратов).

Другая особенность ПЛМК заключается в том, что для программирования используют простейшие специализированные, но эффективные языки программирования или языки символического задания алгоритмов управления: простые, описывающие релейно-контактные схемы; логических функций; описывающие УП с помощью операторов управления; символического кодирования и т. д.

Следующей особенностью ПЛМК является то, что они могут функционировать без постоянного обслуживающего персонала в процессе эксплуатации.

Широкие возможности для построения устройств ЧПУ открывает применение микропроцессоров и мини-ЭВМ.

МикроЭВМ отличаются от мини-ЭВМ меньшими разрядностью слова и объемом памяти, реализованы на минимальном числе интегральных схем с большой степенью интеграции и служат для создания автоматических систем управления несложными объектами; устройств связи с мини-ЭВМ, персональными компьютерами (ПК) и др.

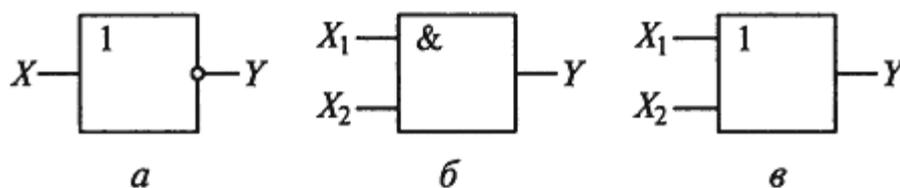
Переход от многокристального микропроцессора к одно-кристальному и, наконец, к микроЭВМ, размещенной на одном кристалле, создает наибольший экономический эффект при реализации упрощенных ЭВМ. Многокристальные микропроцессоры обладают большей функциональной полнотой, вычислительной мощностью и производительностью и наиболее

эффективны при построении микро- и мини-ЭВМ для управления более сложными установками и технологическими процессами.

Современные системы автоматизации производственных процессов в машиностроении часто требуют построения цепей, где реализуется достаточно сложная логика преобразования дискретных входных сигналов в выходные дискретные. Традиционно такое логическое преобразование осуществлялось с помощью релейно-контактных элементов. Однако в последнее время такое преобразование осуществляется с помощью дискретных логических компонентов транзисторных переключательных схем, реализующих те или иные логические функции.

К числу таких логических элементов относятся:

- элемент инвертирования входного дискретного сигнала, эквивалентный размыкающему контакту (на рис. *а*);
- элемент конъюнкции (логического умножения) двух входных дискретных сигналов, эквивалентный последовательному соединению (рис. *б*);
- элемент дизъюнкции (логического сложения) двух входных дискретных сигналов, эквивалентный параллельному соединению (рис. *в*).



Триггер – это типовая ячейка, играющая исключительно важную роль при построении различных переключающих схем и схем с памятью. Слово триггер в переводе с английского означает «курок» – спусковое устройство огнестрельного оружия. Поэтому схемы на триггерах называют также спусковыми схемами.

Статический триггер, наиболее широко применяемый в системах автоматизации производственных процессов в машиностроении, представляет собой двухкаскадный усилитель постоянного тока, охваченный глубокой положительной обратной связью. Это значит, что при малейшем изменении входного сигнала, ведущем к увеличению выходного сигнала, величина сигнала, поступающая на вход триггерного устройства за счет обратной связи, возрастет, что приведет к дальнейшему росту выходного сигнала и т.д. Процесс будет продолжаться лавинообразно, пока на выходе триггера не установится значение выходной величины, равное значению насыщения. Если затем выходная величина начнет уменьшаться, то это приведет к ее дальнейшему уменьшению. Этот процесс падения значения выходной величины также будет происходить лавинообразно, пока на выходе не установится ее нулевое значение. Переключение выходной величины со значения насыщения на нулевое и наоборот осуществляется «щелчком». Таким образом, триггер характеризуется наличием двух, а не одного, стабильных состояний на выходе.

Если из триггерных ячеек построить цепочку, чтобы выход предыдущего триггера являлся входом последующего, и на счетный вход первого триггера подавать серию импульсов (унитарный код), то на его выходе импульсы будут появляться вдвое реже, располагаясь между передними (задними) фронтами входных импульсов.

Таким образом, комбинация состояний триггеров в такой цепочке будет представлять собой двоичную параллельную запись общего числа импульсов, поступивших на счетный вход первого триггера. Такой пакет дискретных значений напряжений может быть использован в дальнейшем в системах автоматизации производственных процессов в машиностроении.

Совокупность триггеров, предназначенная для хранения информации в виде параллельного двоичного кода, носит название *параллельного регистра*. В таких регистрах некоторый обнуляющий сигнал сначала устанавливает все триггеры регистра в исходное (нулевое) состояние.

Подача сигнала на шину, разрешающую запись числа в данный регистр, открывает все входные вентили (входные схемы И) и пропускает значения разрядов записываемого числа на входы соответствующих триггеров, так что соответствующие триггеры «взводятся». При отсутствии сигнала на шине, разрешающей запись, никакие изменения числа на входе регистра не влияют на состояния триггеров. Число, записанное и сохраненное в виде состояний триггеров, появляется на выходах регистра в момент подачи сигнала, открывающего выходные вентили (выходные схемы И). Одна строчка триггеров может быть использована для записи информации, поступающей из нескольких различных мест, а также для передачи ее нескольким другим устройствам. В этих случаях каждый триггер имеет несколько вентилях, соответственно на входе или на выходе, открываемых сигналом, определяющим эти места или устройства.

Разрядными ячейками статических регистров чаще всего являются синхронные триггеры, т.е. такие триггеры, которые имеют специальный вход для синхронизирующего сигнала, и изменяют свое состояние в моменты времени, определяемые подачей этого синхронизирующего сигнала.

Противоположностью им являются используемые в статических регистрах *асинхронные устройства*. В асинхронных устройствах изменения внутренних состояний и связанных с ними выходных сигналов вызываются непосредственно изменениями состояний входов. При этом «новое» состояние асинхронной схемы однозначно определяется «старым» ее состоянием и значением информации, подаваемой на вход триггерной схемы в данный момент.

Наряду с параллельными регистрами широко применяются такие типовые триггерные схемы, как последовательные регистры, чаще называемые *сдвиговыми регистрами*.

Существуют схемы сдвиговых регистров, в которых можно направлять выходы триггерных разрядов с помощью соответствующих вентилях (схем И) в соседние разряды, находящиеся либо справа, либо слева от данного триггерного разряда. Сдвиговые регистры, в которых можно осуществлять сдвиг записанного в них числа как вправо, так и влево, называются реверсивными.

Часто возникает необходимость перевода кода «1 из n » в другие коды, более удобные для преобразования и использования, такие как двоичный или двоично-кодированный десятичный коды. Процесс перевода кода «1 из n » в обычный двоичный код называют кодированием (шифрацией), а обратный перевод двоичного кода в код «1 из n » – декодированием (дешифрацией). Двоичный код называется также «код 8421», поскольку именно таковы относительные веса его соседних разрядов.

Наибольшее распространение получил такой **шифратор**, где входным сигналом является сигнал одной из десяти шин (код «1 из 10»), поступающий, например, от контактов кнопок или путевых выключателей. Этот код преобразуется в код тетрады одного из двоично-десятичных кодов, т.е. в двоичный код соответствующей десятичной цифры, для чего достаточно (с избытком) четырех двоичных разрядов, называемых тетрадой. Одноступенчатые комбинационные шифраторы называются также простыми. Двухступенчатые схемы – это такие схемы, когда выходы простых шифраторов части входных каналов используются в качестве входов других простых шифраторов, осуществляющих окончательное кодирование всех каналов, называются также оптимальными.

Обратной задачей является дешифрация, т.е. выбор в ответ на подаваемый на входы устройства дешифрации код той или иной шины на выходе этого дешифратора. Подавая на входы дешифратора тот или иной код, можно осуществить выполнение требуемой исполнительной команды, например, зажечь сигнальную лампочку, включить или выключить электродвигатель и т.д. Декодеры (**дешифраторы**) позволяют преобразовывать одни виды бинарных кодов в другие. Например, преобразовывать позиционный двоичный код в линейный восьмеричный или шестнадцатеричный код. Преобразование производится по правилам, описанным в таблицах истинности, поэтому построение дешифраторов не представляет трудностей. Для построения дешифратора можно воспользоваться правилами построения схемы для произвольной таблицы истинности.

Цифровое устройство, циклически меняющее свои состояния под действием импульсов, подаваемых на один вход, называется **счетчиком**. Количество тактов, через которое повторяется исходное состояние счетчика, называют **коэффициентом пересчета** (модулем счета) $K_{сч}$. Счетчики строят из цепочек триггеров с динамическим управлением.

По коэффициенту пересчета различают счетчики двоичные ($K_{сч} = 2^n$, где n – разрядность счетчика), десятичные ($K_{сч} = 10^n$, где n – количество декад счетчика), с произвольным постоянным $K_{сч}$, с изменяемым $K_{сч}$ (программируемые).

По направлению счета счетчики делятся на суммирующие, вычитающие, реверсивные.

По способу организации внутренних связей между триггерами счетчики могут быть асинхронными (с последовательным переносом) и синхронными (с параллельным переносом). Синхронные счетчики обладают большим быстродействием.

Регистры представляют собой цепочки триггеров и предназначены для записи, хранения, сдвига и считывания из них двоичной информации (полубайта, байта и т. д.). Различают регистры сдвиговые (со сдвигом вправо, влево и реверсивные), с параллельной загрузкой, универсальные, кольцевые и файловые.

Мультиплексором называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через MUX (*multiplexor*), а также через MS (*multiplex or selector*). Мультиплексор представляет собой комбинированное цифровое устройство, обеспечивающее поочередную передачу на один выход нескольких входных сигналов. Он позволяет передавать (коммутировать) сигнал с желаемого входа на выход, в этом случае выбор требуемого входа реализуется определенной комбинацией управляющих сигналов. Число мультиплексных входов принято называть количеством каналов, их может быть от 2 до 16, а число выходов называют разрядами мультиплексора, обычно это 1 – 4.

Мультиплексоры по способу передачи сигнала разделяют на аналоговые и цифровые.

Демультимплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа, поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультимплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультимплексоры обозначают через DMX или DMS. Если соотношение между числом выходов n и числом адресных входов m определяется равенством $n = 2^m$, то такой демультимплексор называется полным, при $n < 2^m$ демультимплексор является неполным.

Функции демультимплексоров сходны с функциями дешифраторов. Дешифратор можно рассматривать как демультимплексор, у которого информационный вход поддерживает напряжение выходов в активном состоянии, а адресные входы выполняют роль входов дешифратора. Поэтому в обозначении как дешифраторов, так и демультимплексоров используются одинаковые буквы – ИД. Выпускают дешифраторы (демультимплексоры) К155ИД3, К531ИД7 и др.

При использовании КМОП-технологии (*complementary metal-oxide-semiconductor* – набор полупроводниковых технологий построения интегральных микросхем и соответствующая ей схемотехника микросхем) можно построить двунаправленные ключи, которые обладают возможностью пропускать ток в обоих направлениях и передавать не только цифровые, но и аналоговые сигналы. Благодаря этому можно строить мультиплексоры-демультимплексоры, которые могут использоваться либо как мультиплексоры, либо как демультимплексоры. Мультиплексоры-демультимплексоры обозначаются через МХ.

Аналого-цифровое преобразование – это процесс преобразования входной физической величины в ее числовое представление. **Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)** – устройство, в котором осуществляются дискретизация и квантование и которое преобразует входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал. Цифровой сигнал на выходе АЦП представлен, как правило, сигналами на шине данных. Формально, входной величиной АЦП может быть любая физическая величина – напряжение, ток, сопротивление, емкость, частота следования импульсов, угол поворота вала и т.п.

АЦП имеет множество характеристик, из которых основными можно назвать частоту преобразования и разрядность. Частота преобразования обычно выражается в отсчетах в секунду (*samples per second*, SPS), разрядность – в битах. Современные АЦП могут иметь разрядность до 24 бит и скорость преобразования до единиц GSPS (не одновременно). Чем выше скорость и разрядность, тем труднее получить требуемые характеристики, тем дороже и сложнее преобразователь. Скорость преобразования и разрядность связаны друг с другом определенным образом, и можно повысить эффективную разрядность преобразования, пожертвовав скоростью.

Основными типами АЦП являются следующие:

- АЦП параллельного преобразования (прямого преобразования, flash ADC) имеют более высокое быстродействие, но их трудно сделать многоразрядными;
- АЦП последовательного приближения (SAR ADC) называют счетными. Для преобразования необходимо время для подсчета импульсов, поэтому они более медленные, чем параллельные АЦП;
- дельта-сигма АЦП (АЦП с балансировкой заряда).

Существуют также и другие типы АЦП, в том числе конвейерные и комбинированные типы, состоящие из нескольких АЦП с различной архитектурой. Однако перечисленные выше архитектуры АЦП являются наиболее показательными в силу того, что каждая архитектура занимает определенную нишу в общем диапазоне скорость-разрядность.

Наибольшим быстродействием и самой низкой разрядностью обладают АЦП прямого (параллельного) преобразования. Например, АЦП параллельного преобразования TLC5540 фирмы Texas Instruments обладает быстродействием 40MSPS при разрядности всего 8 бит. АЦП данного типа могут иметь скорость преобразования до 1 GSPS. Здесь можно отметить, что еще большим быстродействием обладают конвейерные АЦП (pipelined ADC), однако они являются комбинацией нескольких АЦП с меньшим быстродействием и их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

Среднюю нишу в ряду разрядность-скорость занимают АЦП последовательного приближения. Типичными значениями является разрядность 12-18 бит при частоте преобразования 100KSPS-1MSPS.

Наибольшей точности достигают сигма-дельта АЦП, имеющие разрядность до 24 бит включительно и скорость от единиц SPS до единиц KSPS.

Еще одним типом АЦП, который находил применение в недавнем прошлом, является интегрирующий АЦП. Интегрирующие АЦП в настоящее время практически полностью вытеснены другими типами АЦП, но могут встретиться в старых измерительных приборах.

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – это устройство, преобразующее последовательность входных кодов в соответствующий непрерывный выходной сигнал.

ЦАП применяются для связи цифровых управляющих систем с устройствами, которые управляются уровнем аналогового сигнала. Также ЦАП является составной частью во многих структурах аналого-цифровых устройств и преобразователей.

ЦАП характеризуется функцией преобразования. Она связывает изменение цифрового кода с изменением напряжения или тока. Функция преобразования ЦАП выражается следующим образом

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{МАХ}}}{N_{\text{МАХ}}} N_{\text{ВХ}}$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – значение выходного напряжения, соответствующее цифровому коду $N_{\text{ВХ}}$, подаваемому на входы ЦАП;

$U_{\text{МАХ}}$ – максимальное выходное напряжение, соответствующее подаче на входы максимального кода $N_{\text{МАХ}}$

Величину $K_{\text{ЦАП}}$, определяемую отношением $\frac{U_{\text{МАХ}}}{N_{\text{МАХ}}}$, называют коэффициентом цифроаналогового преобразования. Несмотря на ступенчатый вид характеристики, связанный с дис-

кратным изменением входной величины (цифрового кода), считается, что ЦАП являются линейными преобразователями.

Принцип работы большинства ЦАП – суммирование долей аналоговых сигналов (веса разряда), в зависимости от входного кода.

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи устанавливаются на входе и выходе устройства цифровой обработки сигналов. Центральное место в таких устройствах занимает ЭВМ и алгоритмы ее работы.

Регуляторы непрерывного действия

Управление, имеющее своей задачей изменение по заданному закону или поддержание в установленных пределах физической величины, называется **регулированием**.

Объектом управления может быть техническое устройство, технологический процесс или более простая система управления. Состояние объекта управления определяется рядом величин, характеризующих как воздействия на объект внешней среды и управляющих устройств, так и протекание процессов внутри объекта.

Внешнее влияние на объект представляет собой воздействие. Воздействие, вырабатываемое управляющим устройством – управляющее воздействие. Воздействие, не зависящее от системы управления – возмущение.

Контролируемые величины, характеризующие состояние объекта, по которым ведётся управление, называется управляемыми (регулируемыми).

При изображении системы управления (регулирования) применяются два принципа: функциональный и структурный.

Функциональная схема – блок-схема системы, заданная функциональным назначением элементов.

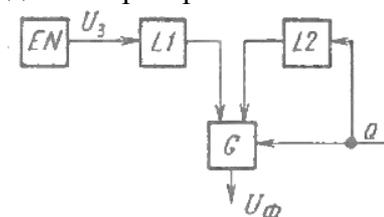
Структурная схема – блок-схема системы, заданная математическими характеристиками элементов.

В зависимости от способов формирования регулирующего воздействия различают следующие принципы регулирования:

- по возмущению;
- по отклонению регулируемой величины от заданного значения;
- комбинированный принцип регулирования.

Принцип регулирования по возмущению состоит в том, что для уменьшения или для устранения отклонения регулируемой величины от требуемого значения, вызываемого возмущающим воздействием, это воздействие измеряется с помощью измерительного элемента, преобразуется с помощью П, СУ, УУ и ИМ в регулирующее воздействие $[\mu(t)]$, которое будучи приложено ко входу объекта регулирования, вызывает компенсирующее отклонение регулируемой величины противоположного знака по сравнению с отклонением, вызываемым возмущающим воздействием. Связь по возмущению [ИЭ и П], суммирующее устройство (СУ), управляющее устройство (УУ) и исполнительный механизм (ИМ) образуют автоматическое регулирующее устройство- регулятор.

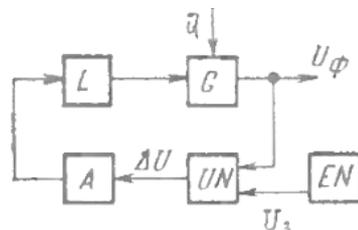
В системе, использующей только такой принцип регулирования, фактическое значение регулируемой величины не учитывается. Принимают во внимание только одно возмущающее воздействие – ток нагрузки I_n . В соответствии с изменением тока нагрузки происходит изменение магнитодвижущей силы (мдс) обмотки возбуждения $L2$, являющейся измерительным элементом данной системы. Изменение мдс этой обмотки приводит к соответствующему изменению напряжения на выводах генератора.



Достоинство принципа по возмущению состоит в том, что возмущающее воздействие может быть устранено до того, как возникает рассогласование. Однако регулятор в таких системах реагирует только на один вид возмущения, поэтому возникает необходимость иметь на одном объекте столько регуляторов, сколько возмущений вызывают отклонение регулируемой величины.

Принцип регулирования по отклонению состоит в том, что измеряется регулируемая величина $[\delta_{oc}(t)]$, сравнивается с требуемым значением (задающим воздействием) $[\alpha(t)]$ и выявляющееся при этом отклонение $[\Delta(t)]$ преобразуется в регулирующее воздействие $[\mu(t)]$. Последнее, влияя на объект регулирования, стремится уменьшить или устранить это отклонение. ИЭ, ЭС, УУ, ИМ образуют регулятор.

При регулировании по отклонению элемент сравнения UN сравнивает фактическое напряжение $U\phi$ с заданным U_3 , определяемым задающим элементом EN . После сравнения на выходе элемента UN появляется сигнал $\Delta U = U_3 - U\phi$, пропорциональный отклонению напряжения от заданного. Этот сигнал усиливается усилителем A и поступает на рабочий орган L . Изменение напряжения на рабочем органе L , которым является обмотка возбуждения генератора G , приводит к изменению фактического напряжения генератора, устраняющего его отклонение от заданного.



Усилитель A , не изменяющий принципа действия системы, необходим для ее практической реализации, когда мощность сигнала, поступающего от элемента сравнения UN , недостаточна для воздействия на рабочий орган L .

В отличие от систем автоматического регулирования (САР) с принципом по возмущению здесь регулирующее воздействие является функцией не возмущающего или задающего воздействия, а отклонения регулируемой величины, вызванного этим воздействием. Измерительный элемент, который измеряет регулируемую величину на выходе объекта и подает ее на элемент сравнения (вход системы) образует главную обратную связь. В системах автоматического регулирования с принципом по отклонению регулируемая величина через главную обратную связь поступает на элемент сравнения (вход системы), т.е. САР с принципом по отклонению является замкнутой.

Принцип комбинированного регулирования сочетает принцип регулирования по отклонению и по возмущению.

В комбинированных системах принцип по отклонению реализуется с помощью главной обратной связи, а принцип регулирования по возмущению - с помощью связи по возмущению.

В комбинированных системах одновременно возможно достижение полной компенсации отклонений, вызываемых основными возмущающими воздействиями, а также уменьшение отклонений, вызываемых второстепенными возмущениями. Системы автоматического регулирования с принципом регулирования по возмущению применяют, когда на объект действует 1-2 возмущения. Замкнутые САР представляют собой системы, в которых на объект регулирования действует большое количество приблизительно одинаковых по величине возмущений. Комбинированные САР используют в тех случаях, когда среди большого количества возмущений можно выделить 1-2 максимальных по амплитуде.

После выбора элементов функциональной схемы требуется произвести ее расчет с целью обеспечения заданных показателей качества работы САР. Этим занимается линейная теория автоматического регулирования (ЛТАР). С точки зрения ЛТАР безразлично, из каких элементов составлена САР, важно лишь математическое описание этих элементов.

Для получения математического описания системы обычно составляют описание её отдельных элементов. В частности, для получения уравнения системы, составляют уравнения отдельных элементов. Совокупность этих уравнений и даёт уравнение системы.

Уравнения, а также структурные схемы автоматической системы называют её математической моделью. Математические модели описывают элементы и системы автоматического регулирования в двух режимах: установившемся – статике и переходном – динамике.

Для синтеза системы автоматического регулирования и её отдельных элементов, а также исследования их характеристик необходимо иметь уравнения, связывающие входные и выходные параметры. Уравнения могут быть получены аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим методами.

Аналитический метод заключается в составлении математического описания объекта, при котором находят уравнения статики и динамики на основе фундаментальных законов, описывающих физические и химические процессы, протекающие в исследуемом объекте с учетом конструкции аппаратуры и характеристик перерабатываемых веществ. Например: законы сохранения вещества и энергии, а также кинетические закономерности процессов химических превращений, переноса тепла и массы. Аналитический метод применяют при проектировании новых технологических объектов, физико-химические процессы которых достаточно хорошо изучены.

К достоинствам этого метода относится отсутствие необходимости проведения экспериментов на реальном объекте; возможность определить математическое описание еще на стадии проектирования системы управления; метод позволяет учесть все основные особенности динамики объекта управления: нелинейность, нестационарность, распределенные параметры и т.д. и обеспечивает получение универсального математического описания, пригодного для широкого класса аналогичных объектов управления.

Недостатки аналитического метода включают трудность получения достаточно точной математической модели, учитывающей все особенности реального объекта; необходимость проверки адекватности модели и реального процесса экспериментальным путем. Кроме того, многие математические модели имеют ряд трудно оцениваемых в численном выражении параметров

Экспериментальный метод состоит в определении характеристик реального объекта путем постановки на нем специального эксперимента. Метод прост, обладает малой трудоемкостью и позволяет достаточно точно определить свойства конкретного объекта.

Экспериментальные методы определения динамических характеристик включают методы определения временных характеристик объекта управления и методы определения частотных характеристик объекта управления.

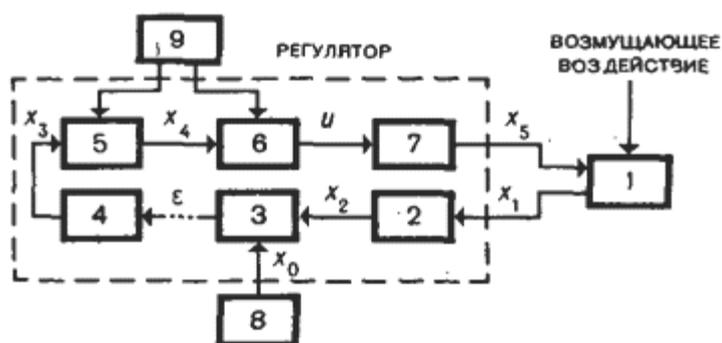
При экспериментальном методе невозможно выявить функциональные связи между свойствами перерабатываемых и получаемых веществ, режимными показателями технологического процесса и конструктивными характеристиками объекта. Этот недостаток не позволяет распространить на другие однотипные объекты результаты, полученные экспериментальным методом.

Наиболее эффективным является экспериментально-аналитический метод, в котором, используя аналитически полученную структуру объекта, ее параметры определяют в ходе натурных экспериментов. Являясь комбинацией аналитического и экспериментального, этот метод учитывает их преимущества и недостатки.

Регуляторы непрерывного действия – это регуляторы, у которых представление входных и выходных величин, а также выполнение всех вычислительных операций осуществляется в непрерывной форме. В общем случае регулятор непрерывного действия, функциональная блок-схема которого приведена на рисунке, состоит из следующих элементов:

- измеритель регулируемой величины 2 – измеряет фактическое значение регулируемой величины x_1 ; в его состав обычно входят чувствительные элементы, реагирующие на x_1 , и датчики, преобразующие x_1 в другие физические величины x_2 , и принятые в качестве носителей информации в последующих блоках;

- сравнивающее устройство 3 – определяет ошибку рассогласования $\varepsilon = x_0 - x_2$, строится на суммирующих элементах;
- вычислительное устройство 4 – формирует управляющий сигнал в соответствии с принятым регулирования законом $x_3 = S(\varepsilon)$, где S – оператор. В регуляторе непрерывного действия для этого используют различные функциональные преобразователи, интегрирующие, дифференцирующие и суммирующие усилители; в сложных системах могут применять АВМ;
- усилительно-преобразовательное устройство 5 – производит усиление управляющего сигнала x_3 до требуемой мощности и, при необходимости, преобразует его в другую физическую природу для согласования с исполнительным устройством (выбор типа и схемы усилителя определяется типом управляющего сигнала, а также типом и мощностью исполнительного механизма);
- исполнительный механизм 6 – преобразует сигнал на выходе усилительно-преобразующего устройства x_4 в механическое перемещение u управляющего органа или самого управляемого объекта (при этом используется либо энергия самого управляющего сигнала, либо энергия дополнительного источника 9);
- регулирующий орган 7 – элемент конструкции либо регулятора, либо самого объекта регулирования 1, отклонение которого x_5 непосредственно воздействует на объект регулирования и приводит к изменению регулируемой величины x_1 (например, заслонка, перекрывающая подачу жидкости);
- 8 – программное устройство.



В конкретных регуляторах непрерывного действия не все указанные выше элементы присутствуют обязательно. Например, в регуляторах прямого действия измерительное устройство непосредственно воздействует на регулирующий орган. В то же время регуляторы непрерывного действия могут быть настолько сложными, что отдельные их элементы могут содержать в себе самостоятельные системы регулирования. Конструктивно регуляторы непрерывного действия иногда выполняют в виде отдельного блока, однако, в большинстве случаев составные элементы этих регуляторов располагают в местах регулируемых объектов.

В общем случае математическая модель регулятора непрерывного действия представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, связывающих входные и выходные величины, параметры регулятора, а также возмущения, действующие на различные элементы регулятора. В эту модель составной частью входит и оператор формирования управляющего сигнала $S(\varepsilon)$ (закон регулирования).

Синтез регуляторов непрерывного действия производится с учетом уравнений объекта регулирования, то есть на основе полной математической модели системы автоматического регулирования. Для изменения статических и динамических характеристик регулятора непрерывного действия с целью лучшего его согласования с объектом в регуляторе непрерывного действия предусматривают различные виды настроек: настройку чувствительности в измерительных устройствах, настройку коэффициента усиления и др. Эти настройки могут осуществляться как вручную, так и автоматически в зависимости от входного воздействия.

Система автоматического регулирования называется устойчивой, если после снятия возмущающего воздействия, которое вывело её из состояния равновесия, она вновь возвращается в состояние равновесия. Если система не возвращается в состояние равновесия после снятия возмущения, она неустойчива.

Автоматические системы управления должны быть не только устойчивыми, но и обеспечивать качество процесса управления. Основные наиболее существенные требования к качеству управления, которые позволяют оценить работу почти всех систем управления, называют показателями процесса управления. Они характеризуют поведение системы в переходном процессе. Показателями качества будет время регулирования, перерегулирование, колебательность процесса, установившаяся ошибка, характер затухания переходного процесса, запас устойчивости.

Качество процессов регулирования обычно оценивают по переходной функции, которая представляет собой реакцию системы на внешнее воздействие типа единичного скачка. Для следящих систем и программного регулирования переходную функцию рассматривают по отношению к задающему воздействию, а для систем стабилизации – по отношению к возмущению.

Время регулирования определяет длительность переходного процесса. Теоретически переходной процесс длится бесконечно долго, однако практически его считают законченным, как только отклонение регулируемой величины от нового ее установившегося значения не будет превышать допустимых пределов.

Временем регулирования называют минимальное время, по истечении которого, начиная с момента начала действия входного сигнала, выходная переменная отклоняется от установившегося значения на величину, не превышающую некоторую заданную постоянную величину 0,5.

Время регулирования характеризует быстродействие системы.

Быстродействие может характеризоваться и временем достижения переходной функцией нового установившегося значения, и временем достижения максимального значения.

Перерегулированием называется максимальное отклонение управляемой величины от заданного значения и выраженной в процентах.

Значения времени регулирования и перерегулирования часто задают в качестве исходных данных для синтеза корректирующих устройств, поскольку правильным выбором и настройкой последних обеспечивается подавление нежелательных колебаний регулируемой величины в переходном процессе. Для некоторых систем перерегулирование вообще недопустимо, например, для систем автоматического регулирования физических величин в процессах, связанных с приготовлением продуктов. Необходимо так же иметь в виду, что стремление уменьшить время регулирования приводит к увеличению мощности исполнительного устройства.

Колебательность процесса характеризуется числом колебаний управляемой величины за время регулирования.

Системы автоматического регулирования предназначены для решения трех задач: стабилизации регулируемой величины (стабилизирующая САР), изменения регулируемой величины по известной (программная САР) или неизвестной (следающая САР) программ.

В стабилизирующих САР заданное значение регулируемой величины постоянно. Примером такой системы может служить система регулирования температуры в рабочем пространстве термической печи. В программных САР значение регулируемой величины изменяется во времени по заранее разработанной (известной) программе.

В следящих системах заданное значение регулируемой величины изменяется во времени по заранее неизвестной программе. Следящие и программные САР отличаются от стабилизирующих принципом обработки задающего сигнала.

Наиболее типичным примером следящего регулирования является автоматическое поддержание заданного соотношения между расходами топлива и воздуха при регулировании процесса горения в топливных плавильных и нагревательных печах.

Непрерывные промышленные регуляторы в зависимости от реализуемого закона регулирования бывают пропорциональные, пропорционально-интегральные и пропорционально-интегрально-дифференциальные.

Работа автоматического регулятора определяется видом зависимости между отклонениями регулируемого параметра и регулирующим воздействием регулирующего органа, происходящим в результате его перемещения. Эта зависимость называется динамической характеристикой регулятора или законом регулирования регулятора. **Законом регулирования** называют математическую зависимость между выходным регулирующим воздействием Y_p и входным отклонением X_p регулируемой величины Y от заданного значения X_o :

$$Y_p = f(X_p), \text{ где } X_p = X_o - Y.$$

По характеру работы регуляторы делятся на непрерывные, импульсные и релейные. Наиболее широкое распространение получили регуляторы непрерывного действия, использующие линейные законы регулирования.

- Пропорциональный (П- регулятор) – простейший регулятор в котором регулирующее воздействие $Y(t)$ зависит только от ошибки $\Delta(t)$. $Y(t) = K_p \cdot \Delta t$. где K_p называется коэффициентом усиления регулятора и может изменяться в пределах $0,1 \leq K_{рег} \leq 40$. В промышленных регуляторах предусмотрена возможность изменение коэффициента усиления. Поэтому он является параметром настройки регулятора. Достоинства таких регуляторов заключаются в их простоте; недостатки – регулятор не может полностью ликвидировать ошибку.
- Интегральный (И- регулятор). Его статическую ошибку можно исключить, если использовать интегральный закон регулирования:

$$Y = K_u \int \Delta dt$$

$$K_u = \frac{1}{T_u}$$

где T_u – параметр настройки регулятора, называемый постоянной времени интегрирования.

Динамические свойства этого регулятора хуже чем у П – регулятора. Т.е. процесс регулирования отстаёт от процесса появления и изменения отклонения, что приводит к слабозатухающим колебаниям регулируемой величины около заданного её значения, т.е. удлиняется время регулирования.

- Пропорционально интегральный (ПИ-регулятор) позволяет устранить недостатки и сохранить преимущества пропорционального и интегрального регуляторов. Закон регулирования имеет вид:

$$Y = K_u \left(\Delta + \frac{1}{T_u} \int \Delta dt \right)$$

Данный регулятор имеет два параметра настройки. Параметр T_u характеризует интенсивность в законе регулирования.

- Пропорционально-дифференциальный (ПД- регулятор). Введение в закон регулирования производной отклонения величины улучшают динамические свойства САР. Регулятор имеет два параметра настройки. Коэффициент называется временем дифференцирования

$$Y = K_u \left(\Delta + T_d \frac{\Delta dt}{dt} \right)$$

- Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД- регулятор). Наличие трех составляющих в законе регулирования позволяет добиться высокого качества процесса регулирования как при установившемся режиме, так и при не установившемся режиме работы САР.

$$Y = K_u \left(\Delta + \frac{1}{T_u} \int \Delta dt \right) + T_d \frac{\Delta dt}{dt}$$

Эти законы регулирования являются наиболее простыми линейными и непрерывными. Наиболее распространенные являются линейные законы. При этом наиболее часто применяется ПИД закон. При этом наиболее часто применяются двухпозиционный линейный закон регулирования. В этом случае регулируемый орган может достичь два фиксируемых положения, соответствующие двум фиксированным значениям регулирующего воздействия вырабатываемого релейными двухкомпозиционными регуляторами.

Выбор типа регулятора или необходимого закона регулирования для конкретного объекта управления является сложной задачей. На выбор оказывает влияние несколько факторов: вид передаточной функции объекта; если объект с запаздыванием, то влияние оказывает отношение общего запаздывания объекта к T_0 – постоянной времени (статический объект с запаздыванием) или к T (астистический объект с запаздыванием). Выбор типа регулятора также зависит от требований к качеству работы проектируемой САУ. Существует ряд диаграмм и эмпирических формул, позволяющих по передаточной функции объекта определить тип регулятора и оптимальные величины его параметров настройки.

Позиционные регуляторы

При автоматизации управления различными технологическими процессами, рабочими механизмами и машинами широко используют логические элементы, на основе которых реализуют (создают) системы дискретной автоматики.

Логические элементы вырабатывают выходной сигнал в зависимости от определенного состояния входных сигналов и реализуют логическую функцию, которая, как и аргументы может принимать только два значения:

1 – сигнал есть (максимальный уровень);

0 – сигнала нет (минимальный уровень).

Логические системы бывают контактные и бесконтактные.

В объектах регулирования, не обладающих самовыравниванием, любое возмущающее воздействие не может быть локализовано без помощи автоматического регулятора, и состояние равновесия не будет достигнуто.

Регулятором называется совокупность регулирующего прибора и исполнительного механизма. Регулирующий прибор состоит из усилителя и корректирующих звеньев, с помощью которых регулятору придаются динамические характеристики, реализующие один из типовых законов регулирования. Составные части регулятора (усилитель, исполнительный механизм и корректирующие звенья) соединяются по трем основным схемам:

- корректирующие звенья включены в обратную связь, охватывающую исполнительный механизм и усилитель;
- корректирующие звенья включены в обратную связь, охватывающую усилитель;
- корректирующие звенья включены последовательно с усилителем и исполнительным механизмом.

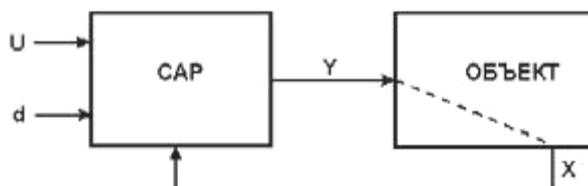
В промышленности для автоматизации разнообразных технологических процессов используется множество регуляторов, отличающихся друг от друга разнообразными признаками. Автоматические регуляторы классифицируются по наиболее характерным признакам:

- по назначению – регуляторы давления, уровня, расхода, температуры и т. д.;
- в зависимости от источника энергии – регуляторы прямого и непрямого действия;
- по конструктивному оформлению – регуляторы приборного типа, в которых все основные элементы, включая измерительное устройство, элемент сравнения с задатчиком и регулирующее устройство, смонтированы в одном корпусе, и агрегатные, состоящие из отдельных унифицированных блоков, каждый из которых имеет определенное назначение, что дает возможность разрабатывать схемы регулирования любой сложности;

- в зависимости от характера воздействия на объект – регуляторы непрерывного и дискретного действия;
- по виду используемой энергии – регуляторы электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные;
- по виду регулирующего воздействия – регуляторы прямого и непрямого действия; для управления регулирующим органом первые, в отличие от вторых, не нуждаются в постороннем источнике энергии.

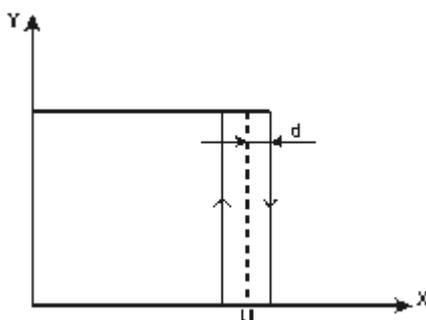
Система регулирования, у которой регулятор имеет характеристику релейного элемента (две позиции: «Открыто» и «Закрыто»), называется системой позиционного регулирования.

Структурная система позиционной системы авторегулирования приведена на рисунке



Позиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы применяются наиболее часто.

Алгоритм регулирования для позиционных регуляторов определяется статической характеристикой регулятора: зависимостью выходного сигнала Y от входного X .



Выходная величина Y равна максимальному воздействию при $E = X - U < -d$, $Y = 0$ при $E > d$, где d – порог.

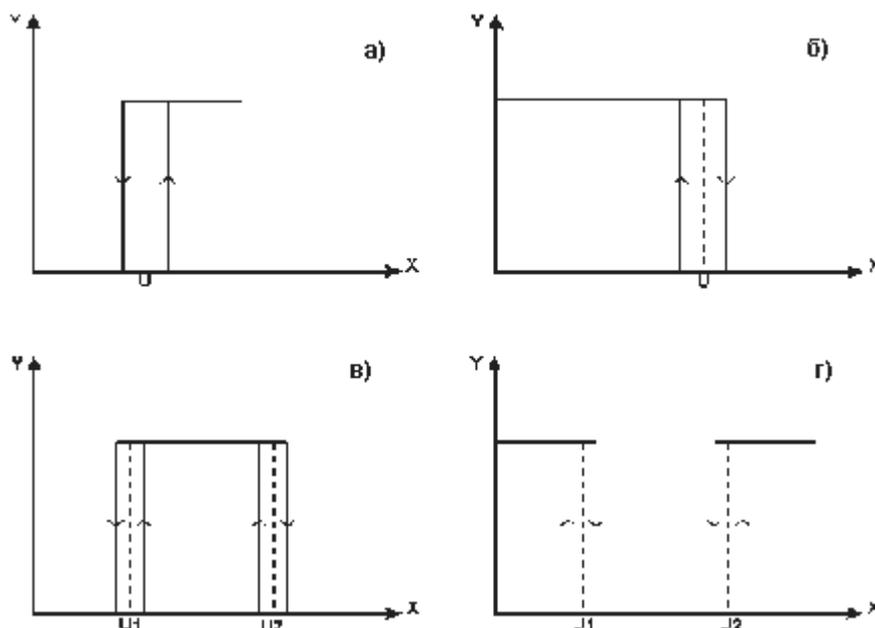
Регулирующий орган в позиционном регуляторе может иметь два или несколько фиксированных положений, каждое из которых соответствует определенным значениям регулируемого параметра. По количеству позиций регуляторы могут быть двухпозиционные, трехпозиционные и многопозиционные.

По виду статической характеристики двухпозиционные регуляторы могут быть в основном следующих видов:

Вид а) применяется для вентиляции, в холодильниках и пр.

Вид б) обычно применяется в различных нагревательных приборах, термощкафах, баках и т.п.

Виды в) и г) применяются для сигнализации выхода системы на рабочий режим. Эти регуляторы еще называют компараторами.



В двухпозиционном регуляторе при отклонении регулируемого параметра от заданного значения (на величину большую, чем нечувствительность регулятора) регулирующий орган занимает одно из крайних положений, соответствующих максимальному или минимальному возможному притоку регулирующего вещества. В частном случае минимальное значение может быть и нулем притока.

Передвижение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое при двухпозиционном регулировании обычно совершается с большой скоростью – теоретически мгновенно за момент времени, равный нулю.

Равенство между притоком и стоком при заданном значении регулируемого параметра не наблюдается. Оно может наступить только лишь при максимальной или минимальной нагрузках. Поэтому при двухпозиционном регулировании система находится, как правило, в неравновесном состоянии. В силу этого регулируемый параметр непрерывно колеблется в обе стороны от заданного значения.

Амплитуда этих колебаний при отсутствии запаздываний, будет определяться нечувствительностью регулятора. Зона возможных колебаний регулируемого параметра зависит от зоны нечувствительности регулятора и ею определяется, если предположить, что запаздывания отсутствуют.

Зоной нечувствительности регулятора называется диапазон изменения регулируемого параметра, требуемый для начала трогания регулирующего органа в прямом и обратном, направлениях. Точность поддержания заданных параметров при двухпозиционном регулировании сравнительно высокая.

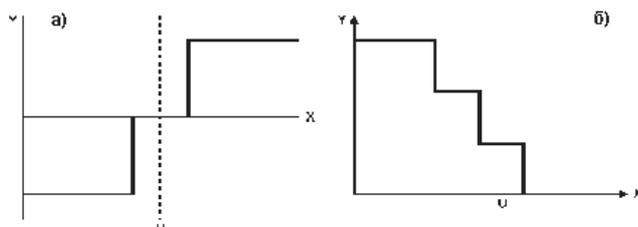
Если же точность регулирования достаточно высокая, то, казалось бы, двухпозиционные регуляторы можно применять на всех объектах. Однако применимость двухпозиционного регулирования в большинстве случаев определяется не достигаемой точностью регулирования, а допустимой частотой переключений. Нужно иметь в виду, что частые переключения приводят к быстрому износу деталей (очень часто контактов) регулятора, а, следовательно, к уменьшению надежности его работы.

Наличие запаздывания ухудшает процесс регулирования, так как увеличивает амплитуду колебаний параметра, но с другой стороны, запаздывание уменьшает частоту переключений и этим как бы расширяет область применения двухпозиционного регулирования.

Двухпозиционный регулятор можно применять в том случае, когда степень самовыравнивания объекта регулирования близка к единице и чувствительность объекта к возмущениям не превышает $0,0005 \text{ 1/c}$, если нет других причин, заставляющих отказаться от этого регулятора

Таким образом, если имеется подходящая характеристика объекта, и нет причин для отказа от двухпозиционного регулятора, всегда нужно стремиться к установке последнего. Этот вид регулятора оказывается наиболее простым и дешевым, надежным в эксплуатации и не требующим квалифицированного ухода. Кроме того, такие регуляторы обеспечивают устойчивое качество регулирования. Немаловажным обстоятельством является и то, что на привод двухпозиционного регулятора очень часто требуется минимум затрат энергии, так как она используется только в моменты закрытия или открытия.

Также могут использоваться многопозиционные регуляторы. Трехпозиционные регуляторы (рис. а) применяются для управления сервоприводом, а также для регулирования микроклимата подогревателем и вентилятором. Четырехпозиционный регулятор (рис.б) применяют для улучшения точности регулирования.



Позиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы применяются наиболее часто.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Лабораторные занятия являются важной составной частью учебного процесса. В рамках этих занятий по дисциплине «Системы управления химико-технологическими процессами» предполагается изучение современных разработок теории и практики автоматического контроля и управления; анализ технологических процессов, агрегатов и их комплексов, как объектов управления; построение математических моделей и алгоритмов оптимального управления технологическими процессами; овладение методами создания систем автоматического и автоматизированного управления с использованием вычислительной техники; выработка практических навыков эксплуатации средств автоматизации.

Цель лабораторного практикума – формирование навыков самостоятельного выполнения заданий на базе существующих методик для достижения желаемого результата.

До начала занятия студенту необходимо ознакомиться с теоретическим материалом, соответствующим данной теме.

Выполнение работы включает несколько этапов:

- формулировка и обоснование цели работы;
- определение теоретического аппарата применительно к данной теме;
- выполнение задания;
- анализ результатов;
- практическое применение изученной методики (выводы);
- защита работы.

Индивидуальные задания представлены конкретно-практическими и творческими задачами.

На первой ступени изучения темы выполняются конкретно-практические задачи, при решении которых формируется минимальный набор умений. Преподаватель опосредованно руководит познавательной деятельностью студентов, консультирует и подробно разбирает со студентами возникшие затруднения в ходе решения задачи, обращает внимание группы на возможные ошибки.

Вторая ступень изучения темы дифференцируется в зависимости от степени усвоения его обязательного уровня. Студенты, усвоив содержание типовых методов и приемов решения задач, приступают к решению творческих задач. Если уровень знаний и умений, демонстрируемых студентом при контрольном обследовании, не соответствует установленным требованиям, студент вновь возвращается к стандартным упражнениям, но под более пристальным наблюдением преподавателя.

После изучения отдельной темы курса дисциплины каждый студент получает оценку по результатам выполнения поставленной задачи.

Лабораторный практикум предполагает выполнение следующих работ:

- 1) Развитие практических навыков работы с комплексными числами
- 2) Анализ и синтез логических схем систем автоматического управления
- 3) Составление структурных схем систем автоматического управления и их теоретическое исследование
- 4) Определение устойчивости САУ с помощью алгебраических и графоаналитических критериев
- 5) Расчет пассивных корректирующих цепей
- 6) Расчет активных корректирующих цепей (регуляторов)
- 7) Определение оптимальных параметров настройки П, ПИ и ПИД регуляторов
- 8) Определение передаточной функции теплотехнического объекта по его разгонной характеристике
- 9) Настройка ПИД регулятора по передаточной функции объекта управления
- 10) Изучение поведения САУ на колебательной границе устойчивости
- 11) Синтез переключаемых функций на логических элементах и реле

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Для успешного усвоения материала студент должен кроме аудиторной работы заниматься самостоятельно. Самостоятельная работа студентов – вид деятельности, при котором в условиях систематического уменьшения прямого контакта с преподавателем студентами выполняются учебные задания. Целью самостоятельной работы студентов является формирование навыков самостоятельного получения новых знаний в определенных областях во взаимосвязи с уже полученными знаниями. Условием эффективности самостоятельной работы студентов является ее систематическое выполнение.

Результаты выполнения самостоятельной работы учитываются в индивидуальном рейтинге студентов.

Цели и задачи самостоятельной работы:

- расширение и углубление теоретических знаний;
- формирование и развитие навыков самостоятельной работы с литературными и Internet-источниками информации;
- формирование способности к приобретению новых профессиональных знаний с использованием современных образовательных и информационных технологий;
- формирование способности к самостоятельному применению методов и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений в областях, непосредственно не связанных со сферой профессиональных компетенций;
- привитие навыков анализа, синтеза, сравнения, обобщения и использования полученной информации;
- приобретение практических навыков работы с документами разного уровня сложности и навыков конспектирования;
- приобретение навыков использования полученной информации в соответствии с поставленными задачами и с учетом действующего законодательства РФ в области авторских прав

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в следующих формах:

- проработка конспектов лекций;
- работа с учебной литературой и Интернет-ресурсами;
- выполнение конспектов тем самостоятельного изучения;
- предварительная подготовка к лабораторным занятиям;
- выполнение отчетов по лабораторным работам;
- подготовка к защите лабораторных работ;
- подготовка к мероприятиям промежуточного контроля;
- выполнение контрольных и индивидуальных заданий, в том числе – компьютерные симуляции;
- подготовка к сдаче коллоквиумов;
- подготовка к экзамену.

В структуре содержания самостоятельной работы по дисциплине химии можно выделить два основных блока: изучение теоретических основ и формирование практических навыков.

Все формы СРС, а также методы контроля способствуют многократному повторению материала, что, в свою очередь, позволяет студенту лучше запомнить термины и определения, понять изучаемый материал, разобраться в алгоритме решения задач и выполнения лабораторных работ. Таким образом, СРС как одна из активных форм обучения студентов способствует формированию у них знаний, умений и навыков, направленных на самостоятельное, творческое решение задач, возникающих в практической деятельности.

Для успешного освоения курса студенты обязаны самостоятельно выполнить ряд работ:

- изучить предлагаемые преподавателем темы теоретического материала и представить их в виде сжатого конспекта, пройти собеседование;

- выполнить в указанные сроки варианты домашних индивидуальных заданий по предложенным темам;
- подготовиться к выполнению лабораторных работ, оформляя в лабораторной тетради проведение опытов, а затем к защите лабораторной работы, пройдя собеседование;
- подготовиться к выполнению тестирования или контрольной работы на аудиторных и внеаудиторных занятиях по изученным темам.

После изучения темы теоретического материала и выполнения лабораторной работы студентам предлагается выполнить либо письменную проверочную или контрольную работу, либо тест. Контрольная или проверочная работа, тест выполняются на отдельных бланках, содержащих задания, варианты ответов (затрытые задания) и место для выполнения открытых заданий. Для успешной подготовки к текущему контролю студентам предлагаются вопросы для изучения и задания.

Математические основы теории линейных систем автоматики

Вопросы для изучения:

1. Основные понятия и определения
2. Характеристика производства как объекта управления
3. Задачи управления технологическим процессом
4. Общая характеристика методов математического моделирования
5. Общая характеристика моделей
6. Классификация систем автоматического управления
7. Основные элементы систем автоматического управления
8. Основные элементы систем автоматического регулирования
9. Сравнительный анализ систем автоматического контроля и автоматического управления

Технические средства автоматизации

Вопросы для изучения:

1. Классификация датчиков для измерения температуры: примеры, принципы действия
2. Классификация датчиков для измерения давления: примеры, принципы действия
3. Классификация датчиков для измерения уровня: примеры, принципы действия
4. Классификация датчиков для измерения расхода: примеры, принципы действия
5. Классификация датчиков для измерения концентрации: примеры, принципы действия
6. Классификация датчиков для измерения плотности вещества: примеры, принципы действия
7. Примеры применения усилителей
8. Шаговые двигатели и примеры их использования
9. Схемы включения датчиков

Основы цифровой техники

Вопросы для изучения:

1. Формирование навыков кодирования информации в двоичном коде
2. Формирование навыков использования десятиричного и шестнадцатиричного кодов
3. История развития цифровой техники
4. Основные элементы ЭВМ
5. Современные тенденции в разработке ЭВМ
6. Гибкие производственные системы
7. Диагностирование технического состояния систем программного управления. Виды диагностики

Регуляторы непрерывного действия

Вопросы для изучения:

1. Основные составные элементы автоматических систем управления
2. Классификация систем по характеру действия
3. Требования к промышленным системам автоматического управления
4. Показатели качества регулирования
5. Классификация и примеры регуляторов
6. Выбор типа регулятора, использование графиков
7. Оптимальные значения параметров настройки регуляторов
8. Примеры применения регуляторов

Позиционные регуляторы

Вопросы для изучения:

1. Классификация регуляторов
2. Основные унифицированные системы регуляторов
3. Составление структурных схем регуляторов, условные обозначения на схемах
4. Построение функциональных и структурных схем АСР с позиционным регулированием
5. Современные регулирующие устройства

Коллоквиум по теме «Системы автоматического контроля»

Вопросы для подготовки:

1. Структура систем автоматического контроля, основные понятия.
2. Классификация систем автоматического контроля:
 - по принципу действия;
 - по назначению.
3. Системы пассивного контроля. Принцип действия. Автоматические сортировщики
4. Системы активного контроля. Контрольно-измерительные машины.
5. Системы автоматической защиты.
6. Датчики систем автоматического контроля.
7. Виды датчиков.
8. Преобразующие устройства.

Коллоквиум по теме «Системы автоматического регулирования»

Вопросы для подготовки:

1. Состав системы автоматического регулирования
2. Классификация систем регулирования производством
3. Автоматическое регулирование по отклонению
4. Автоматическое регулирование по возмущению
5. Системы программного регулирования
6. Типовые динамические звенья САР и их характеристики
7. Устойчивость систем автоматического регулирования.
8. Датчики систем автоматического регулирования.
9. Виды датчиков.
10. Преобразующие устройства.