

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Саратовский государственный аграрный университет  
имени Н. И. Вавилова»**

## **ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Краткий курс лекций**

**для студентов IV курса**

**Направление подготовки**

**37.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной  
продукции**

**Профиль подготовки**

**Технология пищевых производств в АПК**

**Саратов 2018**

Основы автоматизации технологических процессов: краткий курс лекций для студентов IV курса специальности (направления подготовки) 35.03.07 – Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции / Сост.: А.К. Алейников, // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. – 79 с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Основы автоматизации технологических процессов» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для бакалавров направления подготовки 35.03.07 – «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции». Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам дисциплины «Основы автоматизации технологических процессов». Направлен на формирование у бакалавров навыков выбора способов управления и средств автоматизации с учетом требований технологического процесса и безопасности труда.

# **ЛЕКЦИЯ 1**

## **ВВОДНАЯ**

### **ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ, СТРУКТУРА КУРСА.**

Дисциплина «Автоматизированные системы управления» направлена на формирование у студентов общепрофессиональной компетенции ОПК-4, профессиональных компетенций ПК-10, ПК-20.

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать: комплекс измерительных средств (приборов), фиксирующих значения важнейших параметров работы всех технологических аппаратов, 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 пищевой промышленности, методы и средства диагностики и контроля основных технологических параметров, комплекс локальных средств регулирования, определяющих нормальную и безопасную работу оборудования и технологии в целом, централизованную систему управления работой установки, оптимизирующую технологические параметры отдельных ее блоков и обеспечивающую стабильную выработку продуктов заданного качества.

Уметь: определять основные статические и динамические характеристики объектов, выбирать рациональную систему регулирования технологического процесса, выбирать конкретные типы приборов для технологического процесса.

Владеть: методами анализа систем управления технологическими процессами и их влияния на качество получаемых изделий, методами выбора и настройки регуляторов.

#### **1.1 КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Автоматика — отрасль науки и техники, охватывающая теорию и устройство средств и систем автоматического управления машинами и технологическими процессами.

Впервые сведения об автоматах появились в начале нашей эры в работах Герона Александрийского "Пневматика" и "Механика", где описаны автоматы, созданные самим Героном, пневмоавтомат для открытия дверей храма, водяной орган, автомат для продажи святой воды и др.. Идеи Герона - значительно опередили свой век и не нашли применения в его эпоху.

В средние века значительное развитие получила так называемая "андроидная" автоматика, когда механики создали ряд автоматов подражающих отдельным действиям человека, и. чтобы усилить впечатление, изобретатели придавали автоматам внешнее сходство с человеком и называли их "андроидами", т.е. человекоподобными

Весьма интересные андроиды были созданы в XVII - XVIII вв. В XVIII в. швейцарские часовщики Пьер Дро и его сын Анри создали механического писца, механического художника и др. Прекрасный театр автоматов был создан в XVIII в. русским механиком-самоучкой Кулибиным. Его театр, хранящийся в Эрмитаже, помещен в "часах яичной фигуры".

На рубеже XVIII и XIX вв. в эпоху промышленного переворота начинается новый этап в развитии автоматики, связанный с ее внедрением в промышленность. Появились первые автоматические устройства, к которым относятся регулятор уровня Ползунова (1765 г.), регулятор скорости паровой машины Уатта (1734 г.). система программного управления ткацким станком Жаккара (1804 - 1808 гг.) и т.д. Этим было положено начало регуляторостроения, с появлением механизированного производства на базе прядильных и ткацких станков, паровых и других машин, которые заменили ручной труд и дали возможность повысить его производительность.

Самый известный из первых регуляторов - центробежный регулятор Уатта для стабилизации частоты вращения турбины

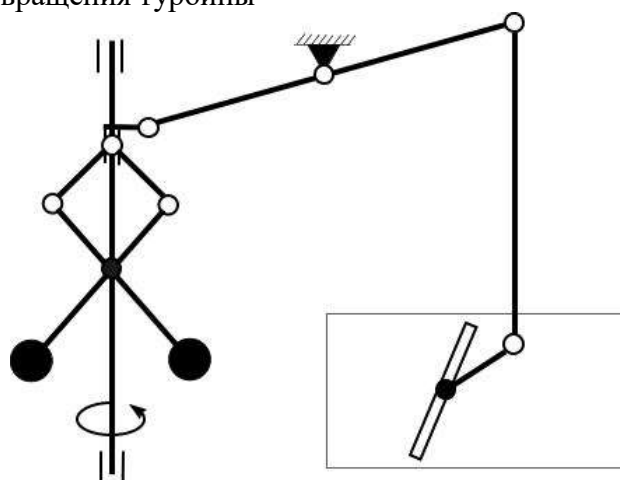


Рис. 1.1 Регулятор Уатта

В 1854 г выдающийся русский механик и электротехник К. Константинов предложил использовать в паровых машинах "Электромагнитный регулятор скорости вращения", а А. Шпаковский в 1866 г разработал регулятор, изменяющий подачу топлива в топку соответственно изменению давления пара в котле. В 1879 г И. Возняковским и К. Ворониным впервые был осуществлен принцип прерывистого регулирования при управлении питанием котла водой.

Если первые регуляторы были связаны с паровой машиной, то со второй половины XIX в. существенную роль в регуляторостроении начинают играть потребности в электрическом освещении. Так в 60-е годы в работах В. Николаева впервые был применен электрический двигатель, а в 1874 г он предложил и осуществил метод регулирования, составляющий основу современной электромашинной автоматики.

Этот новый период развития автоматики - период регуляторостроения, длившийся свыше полутора столетий, сыграл огромную роль в технике. В это время еще медленно и смутно начинают формироваться важнейшие принципы автоматики: принцип регулирования по отклонению Ползунова – Уатта, развившийся в концепцию обратных связей; принцип регулирования по нагрузке, послуживший основой теории инвариантности, и др. Начиная с курса профессора Петербургского университета Д Чиждва в 1823 г, теория регуляторов входит составным элементом в курсы и монографии по механике и паровым машинам.

Общая теория регуляторов была разработана, в основном, в 1868 - 1876гг в работах Д. Максвелла и И. Вышнеградского. основополагающими трудами Вышнеградского являются: "Об общей теории регуляторов". "О регуляторах непрямого действия". В этих работах можно найти истоки современных инженерных методов исследования устойчивости и качества регулирования.

Достойным продолжателем дела И. Вышнеградского был словацкий инженер А. Сгодолa, работы которого посвящены исследованию устойчивости ряда схем регулирования, в частности непрямого регулирования с жесткой обратной связью. В этот же период сформулированы алгебраические критерии устойчивости Рауса и Гурвица.

Бурный рост промышленности отражается и на развитии работ в области теории регулирования. В конце XIX в. и начале XX столетия создаются новые виды электромеханических регулирующих приборов такие как программные регуляторы

следящие системы и схемы компаундирования. Так в 1877 г. А. Давыдов разработал проект первой следящей системы, содержащей электрические элементы, предназначенной для автоматического придания орудия надлежащего угла возвышения в соответствии с изменением расстояния до цели, которая была продемонстрирована в 1881 г.

В 1882 г. на Промышленно-художественной выставке в Москве был показан прототип современного программного регулятора, разработанного Н. Захаровым. До настоящего времени используется принцип "установления допустимых предельных значений регулируемого параметра", предложенный в 1884 г. Л. Снегуровым. В этот же период развивается параметрическое регулирование: разработаны дифференциальный регулятор В. Николаевым и схема компаундирования генераторов М. Доливо-Добровольским.

Большое значение для развития теории регулирования имели исследования А. Ляпунова. Его труд, опубликованный в 1892 г., "Общая задача устойчивости движения" явился важной вехой в развитии теории устойчивости. В этой работе, А. Ляпунов дал первое в истории науки математически строгое определение устойчивости движения, а также разработал два метода решения задач об устойчивости. Первый заключается в обосновании и установлении точных границ применимости анализа устойчивости, основанного на линейных дифференциальных уравнениях, а второй позволяет исследовать устойчивость не только при бесконечно малых отклонениях - "устойчивость в малом", но и при конечных отклонениях - "устойчивость в большом".

Крупный вклад в теорию внес Н. Жуковский, который создал теорию орбитальной устойчивости на основе вариационных принципов динамики, а также дал математическое описание процессов в длинных трубопроводах, рассмотрел влияние сухого трения в регуляторах, исследовал некоторые процессы импульсного регулирования. Им написан первый русский учебник "Теория регулирования хода машин" (1909 г.).

К началу XX в. и в первом его десятилетии теория автоматического регулирования формируется как общая дисциплина с рядом прикладных разделов. Особенно четко мысль о теории регулирования как дисциплине общетехнического характера проводится в работах И. Вознесенского (1922 - 1949 гг.) - руководителя одной из крупных советских школ в этой области, который в 1934 г. впервые выдвинул принцип автономного регулирования. Большой его заслугой является разработка общего метода разбиения процесса регулирования с несколькими регулируемыми величинами на ряд автономных процессов.

В тридцатые годы XX в. создаются более эффективные методы исследования в частности частотные. Появляются работы Х. Найквиста (1932 г.), содержащие критерий устойчивости радиотехнических усилителей с обратной связью и А. Михайлова (1938 г.) "Гармонический метод в теории регулирования", которые вошли в практику в послевоенные годы. В 1946 г. Г. Боде и Л. Маккол ввели логарифмические частотные характеристики Г. Браун, А. Холл, Д. Кемпбелл, Г. Честнат, В. Солодовников завершили разработку частотных методов синтеза и расчета систем, придав им форму, удобную для инженерных расчетов.

В 40 - 50-е годы разрабатываются основы теории нелинейных систем сложность которых состоит в отсутствии единого общего математического аппарата. Здесь следует отметить работы по устойчивости А. Лурье (1944 - 1951 гг.) \_ А. Летова (1955 г.). Завершающим этапом этого направления считается разработка теории абсолютной устойчивости, выдвинутой А. Лурье и В. Постниковым. (1944 г.), более детально

сформулированной М. Айзерманом (1949. 1963 гг.)

Большое значение для качественного исследования нелинейных систем имеют методы фазовой плоскости и фазового пространства, основы которых заложены А. Андроновым и его школой в 1930 - 1940 гг.

Я. Цыпкиным разработаны основы теории релейных (1955 г.) и импульсных (60-е годы) систем с различными видами модуляции. Н. Крыловым и Н. Боголюбовым (1934 г.) разработан метод гармонического баланса для определения параметров автоколебаний и условий их возникновения.

В послевоенные годы теория автоматического управления развивалась плодотворно, и упомянуть обо всех направлениях и авторах просто невозможно. Вот некоторые из них: теория автоматического регулирования по возмущению, теория компенсации возмущений и инвариантности разработаны в трудах Г. Шипанова, В. Кулебакина, Б. Петрова и др., принципы экстремального управления и теория поиска экстремума разработаны В. Казакевичем, А. Фельдбаумом, А. Красовским. В эти же годы создаются основы теории оптимального управления Л. Понтрягиным, А. Летовым, Н. Красовским и др.

В настоящее время значение теории автоматического управления переросло рамки только технических систем. Динамические управляемые процессы имеют место в живых организмах, экономических и организационных человеко-машинных системах, их влияние существенно и отказ от них приводит к крупным потерям.

Дальнейшее развитие и усложнение систем автоматически привело к созданию автоматизированных систем управления (АСУ) технологическими процессами (АСУТП) производством (АСУП) и отраслью (АСУО). По идеологии построения эти системы достаточно близки между собой, хотя функции и технические средства, на которых реализуются эти АСУ, характер решаемых задач существенно отличаются.

## **1.2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Для описания автоматизированных систем используют специальную терминологию, применяемую при разработке систем автоматизированного управления технологическими процессами и оборудованием.

ТАУ — теория автоматического управления — это совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющих спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ).

САУ — система автоматического управления — совокупность технических средств по управлению значением регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специального технического устройства — автоматического регулятора, программируемого контроллера или компьютера. Основной частью (узлом, элементом) САУ является объект управления.

Объект управления — это техническая установка, оборудование (отжимной пресс, выпарная установка, автоклав и др.) или технологическая цепь установок, физико-химические процессы (нагрев, охлаждение, хранение, смешивание и т. д.), которыми управляют с помощью специальных технических средств.

Технологические параметры — это физико-химические величины, характеризующие состояние технологического процесса в объекте управления. Например: температура, давление, частота вращения и др.

Регулируемый параметр — это технологический параметр, значением которого управляют с помощью специальных технических средств. Число регулируемых параметров, как правило, значительно меньше общего числа технологических параметров.

Параметры состояния объекта — выходные величины, объективные показатели объекта в заданный момент времени, измеряемые в определенных физических (градусы, килограммы и др.) или относительных (доли, проценты, баллы и т. п.) единицах.

Управление объектом — это процесс воздействия на объект с целью достижения показателей состояния заданных значений в определенный момент времени.

Цель управления — достижение необходимого состояния объекта, заданного значениями его параметров, например температуры при варке сырья или влажности продукта в процессе хранения. Цель управления в данный момент времени считается достигнутой, если получены заданные значения параметров объекта управления.

Система ручного регулирования (СРР) — это совокупность технических средств по управлению значением регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляет человек-оператор.

Воздействия — факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Они могут быть возмущающими и управляющими.

Возмущающие воздействия носят случайный, труднопредсказуемый характер, например температура наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др.

Управляющие воздействия — это воздействия на объект управления, организуемые техническим устройством или человеком-оператором с целью компенсации влияния возмущающих воздействий.

Сигналы — совокупность потоков энергии или вещества, поступающих или выходящих из объекта управления, возмущающие и управляющие воздействия, а также регулируемый параметр.

Под автоматизацией производственных процессов понимают комплекс технических мероприятий по разработке новых технологических процессов и создание производства на основе высокопроизводительного оборудования, выполняющего все основные операции без непосредственного участия человека.

Автоматизация способствует значительному повышению производительности труда, улучшению качества продукции и условий труда людей.

По мере развития техники функции управления процессами и машинами расширялись и усложнялись. Человек уже во многих случаях не мог эффективно управлять механизированным производством без специальных дополнительных устройств. Это обусловило возникновение автоматизированного производства, при котором работники высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными процессами и операциями, а также управления ими.

В сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности автоматизируют контроль и управление температурой, влажностью, давлением; регулирование скорости перемещения, сортирование по качеству, упаковывание и многие другие процессы и операции производства, хранения и переработки продукции, обеспечивающие более высокую эффективность, экономию труда и средств.

Производственный процесс называют автоматическим, если все его этапы, включающие в себя получение, передачу, преобразование, использование материалов, энергии и информации, осуществляются без непосредственного участия человека.

В состав перерабатывающей промышленности входит большое количество разнообразных производств. Каждое из них характеризуется своими специфическими задачами в области автоматизации, что объясняется огромным разнообразием производственных процессов, использующих механические, химические, физико-

химические и другие методы обработки сырья и полуфабрикатов. Исходные материалы, используемые в большинстве производств, отличаются большой нестабильностью физико-механических и геометрических параметров. Это обстоятельство может приводить к значительному разбросу параметров полуфабрикатов и готовых изделий. Для получения конечного продукта необходимого качества промежуточные параметры технологических процессов должны поддерживаться в достаточно узких пределах. В результате требуется с высокой точностью поддерживать на заданном уровне или изменять по заданному закону большое количество различных параметров технологических процессов. Решение данной задачи невозможно без повышения уровня автоматизации перерабатывающей промышленности. Это позволит значительно улучшить качество продукции при увеличении производительности, улучшении условий труда и увеличении экономической эффективности (прибыли) производства. Промышленные автоматические системы в зависимости от выполняемых ими функций можно классифицировать на автоматические системы контроля и автоматические системы управления.

Автоматическая система контроля решает задачу сбора информации, т.е. сведений о состоянии одного или нескольких параметров, характеризующих тот или иной производственный процесс или объект. В подобных устройствах конечный результат контроля может выражаться в форме регистрации состояния параметра, в виде сигнализации при наступлении определенных состояний, в сортировке по тем или иным признакам и т. д.

Автоматический контроль широко распространен. Такому контролю подвергаются сырье, исходные материалы, параметры технологических процессов, параметры, характеризующие работу оборудования, полуфабрикат и, наконец, готовая продукция.

Сейчас нет ни одного производства, в котором хотя бы частично не осуществлялся автоматический контроль за ходом производственных процессов. Автоматический контроль (и измерение) имеет не только большое самостоятельное значение, но и является основой, как мы увидим в дальнейшем, других, в т. ч. самых сложных систем автоматики (автоматическое управление, регулирование и др.).

Устройства автоматического контроля и измерения применяются для осуществления контроля производственного процесса. При этом могут преследоваться различные цели. Прежде всего, это наблюдение за ходом производственного процесса или контроль качества изделий. Автоматический контроль используется для получения показателей, необходимых для учета работы той или иной производственной установки, агрегата, конвейера, поточной линии и т. д.). Для производств перерабатывающей промышленности особый интерес представляет учет штучных предметов, длины, площади и массы твердых тел, объема и массы жидкостей и газов.

### **1.3 КЛАССИФИКАЦИЯ САУ**

В соответствии с выполняемыми функциями автоматические устройства делятся на классы:

Системы дистанционного управления позволяют управлять на расстоянии отдельными агрегатами или их составными частями. В ряде случаев эти системы являются резервом при выходе из строя автоматических устройств, а так же пуска наладочных испытаний и др. ситуаций.

Телеуправление - устройство передачи сигналов по небольшому числу каналов связи. Каждому управляющему сигналу при дистанционном управлении соответствует свой канал связи, в системах телеуправления по одному каналу передается несколько управляющих сигналов с частотным или временным уплотнением.

Системы автоматического управления. В этих системах действие обслуживающего персонала по управлению технологическим оборудованием заменяется действием программных устройств(управляющих ЭВМ), которые контролируют параметры технологических процессов и передаёт сигналы по управлению оборудованием.

Системы автоматического контроля. Такая форма автоматизации управления, при которой автоматические устройства только собирают информацию о ходе технологического процесса без обратного воздействия на объект. Эти приборы только реагируют на изменения параметров технологического процесса.

Системы автоматической сигнализации. Предназначена для своевременного оповещения о значении контролируемых параметров и состояния оборудования. Сигнализации бывают:

- Командной (оповещение)

- Контрольной (вкл./откл. исполнительных механизмов)

- Предупредительной (о приближении контролируемой величины к аварийному значению)

- Аварийная (аварийное отключение устройств).

Система автоматической защиты. Предназначена для защиты персонала и оборудования от аварии.

Система автоматической блокировки. Защищает технологическое оборудование от неправильных действий персонала. Автоматическое блокирование бывает 2-х видов:

- Запретно/разрешающие (предотвращают варианты неправильного вкл./откл. Оборудования)

- Аварийные блокировки обеспечивают правильную последовательность отключения оборудования в случае аварии.

Система автоматического регулирования предназначена для поддержания на постоянном уровне или изменения по определённому закону какой-либо технологической величины.

К устройствам автоматического контроля можно отнести и различные виды автоматической сигнализации. Командная сигнализация предназначена для передачи типовых командных сигналов от одного поста управления к другому. Контрольная технологическая сигнализация служит для автоматического извещения о включении в работу или останове отдельных установок, вспомогательных устройств (например, нагревательных элементов), о положении запорных органов на различных коммуникациях и т. п. Предупредительная сигнализация автоматически извещает персонал о возникновении опасных изменений режима, которые в дальнейшем могут привести к аварии. Сигнализация всех видов может быть световой (оптической) или звуковой (акустической). Схемы автоматической сигнализации аварийных режимов, как правило, имеют оба вида сигналов, которые при возникновении аварийной ситуации подаются одновременно.

Отдельно следует остановиться на «автоматической защите и блокировке». При возникновении ненормальных режимов устройства автоматической защиты либо прекращают контролируемый производственный процесс, например, отключают электрические устройства и электрические сети при коротких замыканиях, либо обеспечивают другие меры для ликвидации опасности, например, открывают предохранительный клапан для снижения давления в резервуаре, когда оно превышает предельно допустимое значение.

Между автоматической защитой и автоматической сигнализацией существует тесная связь. И для того, и для другого часто используется одно и то же автоматическое

устройство. Например, контролируя давление какой-либо среды в резервуаре, автоматическое устройство может сначала дать сигнал о начавшемся повышении давления, а потом сбросить его, если будет превышен допустимый предел.

Особым видом автоматической защиты является автоматическая блокировка. Устройства автоблокировки предотвращают возможность неправильных включений и выключений оборудования и тем самым предупреждают повреждения или даже аварии, которые могут возникать из-за невнимательности обслуживающего персонала, неправильно понятой команды и других причин. В качестве примера можно указать на блокировочные устройства.

Поскольку действие устройств автоматической защиты, так или иначе, связано с органами управления производственными процессами, машиной, аппаратом и т. п., ее можно рассматривать как разновидность автоматического управления. Автоматические системы управления предназначены для управления работой тех или иных технических агрегатов или протеканием каких-либо процессов без непосредственного участия человека.

Управлением в широком смысле слова называется организация того или иного процесса, обеспечивающая достижение определенной цели. Управляемым процессом может быть процесс производства какого-либо продукта или изделия. Цель управления в этом случае заключается в создании продукта или изделия с заданными характеристиками и свойствами.

Управляемые процессы, так же, как и цели управления, могут быть разнообразными. В связи с этим существует громадное разнообразие автоматических систем управления, которые классифицируются по различным признакам.

Прежде всего, автоматические системы можно подразделить два основных класса: циклические и ациклические. Циклические (или детерминированные) автоматические системы достигают поставленной цели без всякой свободы выбора, не выходят за пределы установленной для них жесткой программы вне зависимости от условий фактического протекания процесса. В подобных системах контрольная информация или отсутствует, или имеет вспомогательное значение. Важнейшими представителями этих систем являются машины-автоматы, автоматические линии и т. п.

Ациклические (или информационные) автоматические системы функционируют на основе полученной или контрольной информации о фактическом протекании управляемых процессов. В информационной автоматической системе происходит постоянный обмен информацией между управляемым процессом (объектом) и управляющей частью системы. В дальнейшем мы будем рассматривать только информационные автоматические системы — автоматические системы управления, и главным образом их частный случай = автоматические системы регулирования.

Наиболее важным и чаще других встречающимся представителем автоматических систем управления в технике являются автоматические системы регулирования. Автоматическим регулированием называется изменение какого-либо параметра процесса по определенному закону без непосредственного участия человека. Параметр процесса, подлежащий регулированию, называют регулируемой величиной, а техническое устройство, в котором протекает процесс, требующий автоматического регулирования, объектом регулирования.

Автоматическое регулирование является частным случаем автоматического управления. Управляемым процессом в этом случае является процесс изменения регулируемой величины во времени (или как функции какой-либо другой величины), а цель управления заключается в обеспечении соответствия изменения регулируемой

величины определенному закону — алгоритму функционирования автоматической системы регулирования. Возможности современной автоматики существенно расширили применение ЭВМ, особенно в кибернетических системах, предназначенных для решения задач, значительно более сложных, чем задачи, решаемые автоматическими системами регулирования. К таким задачам относятся, в частности, самонастройка и даже самоорганизация автоматических систем (адаптивных систем), обеспечение оптимального функционирования технических устройств, протекания производственных процессов и др. Например, экстремальные системы не только решают обычную задачу следования закону изменения регулируемой величины, но и автоматически ищут наиболее выгодное значение требуемой регулируемой величины, т. е. то ее значение, которое необходимо в данный момент выдерживать, чтобы при изменяющихся внешних условиях режим работы объекта регулирования был экстремальным (имел максимальный КПД, минимальный расход энергии и т. п.).

Широкое распространение получили машины (станки) с цифровым программным управлением. На базе этих машин создаются сложные автоматизированные комплексы.

Применение ЭВМ в сочетании с устройствами для получения контрольной информации о фактическом протекании технологического процесса (с обратными связями) позволяет осуществить всесторонний контроль и анализ технологического процесса и по специальным программам изменять его, настраивать на оптимальный (в определенном смысле) режим.

#### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.**

1. Перечислите основные структурные элементы систем автоматического управления?
2. Приведите примеры входных и выходных сигналов в САУ?
3. Какой вид имеют статические характеристики линейных систем?
4. Какие объекты называются объектами с самовыравниванием?
5. Чем вызвано применение различных динамических характеристик?
6. Как получить передаточную функцию системы, если для нее известно дифференциальное уравнение?

#### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П.,
2. Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
3. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
4. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов:
2. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов:
3. ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
4. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## ЛЕКЦИЯ 2

### СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ И ЗВЕНЬЕВ УПРАВЛЕНИЯ

#### 2.1 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА

В ТАУ широкое применение получила операционная форма записи операторов САУ. Она получается в результате применения к оператору САУ преобразования Лапласа. Напомним основные определения и свойства этого преобразования.

Преобразованием Лапласа функции  $x(t)$  называется функция

$$X(p) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt, \quad (2.1)$$

здесь  $x(t)$  - оригинал функции,  $X(p)$  - ее изображение по Лапласу,  $L$  - условное обозначение оператора преобразования. На практике для получения изображений известных функций пользуются не формулой (2.1), а результатами ее применения, сведенными в таблицу 2.1.

1) Изображение производной:

$$L[x(t)] = X(p);$$

$$L[\dot{x}(t)] = p \cdot X(p) - x(0);$$

$$L[\ddot{x}(t)] = p^2 X(p) - px(0) - \dot{x}(0);$$

.....

$$L[x^{(n)}] = p^n X(p) - p^{n-1}x(0) - \dots - p \cdot x^{(n-2)}(0) - x^{(n-1)}(0);$$

где  $x(0), \dot{x}(0), \dots, x^{(n-1)}(0)$  - ненулевые начальные условия функции  $x(t)$  и ее производных.

В частности, при нулевых начальных условиях

$$L[\dot{x}(t)] = p \cdot X(p);$$

$$L[\ddot{x}(t)] = p^2 X(p); \quad (2.2)$$

.....

$$L[x^{(n)}] = p^n X(p);$$

Эти формулы чаще всего используются в ТАУ.

2) Изображение интеграла:

$$L\left[\int_0^t x(\tau) d\tau\right] = \frac{X(p)}{p}$$

3) Теорема смещения:

$$L[x(t - \tau)] = X(p) \cdot e^{-p\tau}.$$

4) Предельные теоремы:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} x(t) &= \lim_{p \rightarrow \infty} pX(p); \\ \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) &= \lim_{p \rightarrow 0} pX(p). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Обе теоремы справедливы тогда, когда существуют пределы, записанные в левых частях приведенных формул.

В ТАУ также широко применяется оператор обратного преобразования Лапласа, позволяющий определить оригинал (функцию времени) по его изображению:

$$x(t) = L^{-1}[X(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} X(p) \cdot e^{pt} dp, \quad (2.4)$$

$\sigma$  - вещественное число;

$j$  - мнимая единица.

Если функция  $x(t)$  - элементарная, то операция (2.4) просто выполняется с помощью таблицы 2.1.

Таблица 2.1

| №<br>п/п | $x(t) = L^{-1}[X(p)]$   | $X(p) = L[x(t)]$                    |
|----------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1        | $\delta(t)$             | $1$                                 |
| 2        | $1(t)$                  | $\frac{1}{p}$                       |
| 3        | $t^k$                   | $\frac{k!}{p^{k+1}}$                |
| 4        | $e^{-at}$               | $\frac{1}{p+a}$                     |
| 5        | $t \cdot e^{-at}$       | $\frac{1}{(p+a)^2}$                 |
| 6        | $1 - e^{-at}$           | $\frac{a}{p(p+a)}$                  |
| 7        | $\sin \omega t$         | $\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$     |
| 8        | $\cos \omega t$         | $\frac{p}{p^2 + \omega^2}$          |
| 9        | $e^{-at} \sin \omega t$ | $\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$ |
| 10       | $\delta(t - \tau)$      | $e^{-p\tau}$                        |

В операционном исчислении разработаны различные методы обращения преобразования Лапласа. Один из наиболее эффективных и распространенных методов основан на использовании теоремы разложения.

Теорема разложения

Пусть изображение по Лапласу выходного сигнала  $y(t)$  имеет вид:

$$Y(p) = \frac{N(p)}{M(p)}, \quad (2.5)$$

где  $N(p)$  и  $M(p)$  - полиномы от  $p$  степени  $\nu$  и  $\mu$  соответственно

и корни  $p$  уравнения

$$M(p) = 0 \quad (2.6)$$

различны, тогда оригинал определяется по формуле

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\mu} c_i e^{p_i t}, \quad (2.7)$$

где 
$$c_i = \frac{N(p_i)}{M'(p_i)}, \quad M'(p_i) = \frac{dM(p)}{dp}.$$

Таким образом, для определения функции  $y(t)$  необходимо определить ее изображение по Лапласу в виде (2.5), решить уравнение (2.6) и, если его корни различны, применить теорему разложения (2.7), в противном случае необходимо применить другие методы операционного исчисления.

## 2.2 ОПЕРАТОР САУ

В начале исследования любая САУ представляет собой как бы "черный ящик", на вход которого подаются сигналы  $x(t)$ ,  $f(t)$ , а на выходе измеряется регулируемый сигнал  $y(t)$ . Исследование САУ возможно, если известен ее оператор.

Оператором САУ называется правило, которое определяет единственный выходной сигнал по заданной совокупности входных сигналов.

Оператор САУ, представленный в виде математических формул, называется ее математической моделью (ММ).

В дальнейшем не будем различать понятия "оператор" и "математическая модель". Математически оператор записывается следующим образом:

$$y(t) = A [ x(t), f(t) ],$$

где  $A$  - обозначение оператора. Часто используется графическое изображение операторов САУ и ее элементов:

Процесс определения оператора САУ по данным измерения входных и выходных сигналов называется идентификацией.

В теории автоматического управления фундаментальное значение имеет разделение САУ на линейные и нелинейные.

Линейной называется САУ, оператор которой удовлетворяет принципу суперпозиции. САУ, оператор которой не удовлетворяет принципу суперпозиции, называется нелинейной.

Оператор удовлетворяет принципу суперпозиции, если он преобразует любую линейную комбинацию входных сигналов в такую же линейную комбинацию выходных сигналов.

Математически принцип суперпозиции записывается следующим образом: пусть  $y = A(x)$ , тогда если

$$A [ c_1 x_1 + c_2 x_2 ] = c_1 A [ x_1 ] + c_2 A [ x_2 ], \quad (2.8)$$

то принцип суперпозиции выполняется.

Приведенное определение принципа суперпозиции справедливо и для случая  $n$  входных сигналов. На основе формулы (2.8) легко доказываются основные свойства линейных САУ:

1) реакция линейной системы на сумму сигналов равна сумме ее реакций на каждый из этих сигналов;

2) при увеличении входного сигнала в  $k$  раз выходной сигнал увеличивается во столько же раз;

3) реакция линейной системы на нулевой входной сигнал равна нулю;

4) сумма линейных операторов есть линейный оператор. Примерами линейных операторов являются оператор дифференцирования, оператор преобразования Лапласа,

оператор линейного преобразования. Линейность этих операторов предлагается доказать самостоятельно.

Фундаментальным в ТАУ является разделение САУ на стационарные и нестационарные.

Стационарной называется САУ, оператор которой не изменяет своих свойств по преобразованию входного сигнала в выходной с течением времени.

Математически условие стационарности САУ записывается следующим образом:

$$y(t-\tau) = A [ x(t-\tau) ],$$

где  $x(t) = A [ y(t) ]$ ,  $\tau$  - произвольное число.

То есть, оператор стационарен, если реакция на смещенный на время  $\tau$  входной сигнал равна смещенной на время  $\tau$  реакции на исходный сигнал.

Для примера рассмотрим оператор линейного преобразования

$$y(t) = a(t) x(t) = (b_1 t + b_0) x(t).$$

$$\text{Тогда } y(t-\tau) = (b_1 t - b_1 \tau + b_0) x(t-\tau).$$

Условие стационарности:  $a(t) = a(t-\tau) = \text{const}$  или  $b_1 = 0$ . Т.е. оператор линейного преобразования будет стационарен только при постоянном во времени коэффициенте линейного преобразования:

$$a(t) = \text{const}.$$

Как было показано ранее, САУ представляет собой совокупность большого числа элементов: объекта управления, датчиков информации, устройств обработки информации, исполнительных устройств. Каждый из этих элементов имеет свой вход и свой выход, т.е. характеризуется направленностью преобразования информации. Связи между входными  $x(t)$ ,  $f(t)$  и выходными сигналами  $y(t)$  элементов САУ в общем случае определяются системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений:

$$F_i [y_i(n), y_i(n-1), \dots, y_i(1), y_i, x_i(n-1), \dots, x_i(1), x_i, f_i, t] = 0. \quad (2.12)$$

где  $i = 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  - число элементов САУ.

Для анализа преобразующих свойств САУ необходимо задать входные сигналы  $x_i(t)$ ,  $f_i(t)$ , начальные условия  $y_i(0)$ ,  $y_i(1)(0)$ , ... и решить совместно систему дифференциальных уравнений (2.12), т.е. определить выходной сигнал САУ  $y(t)$  и, если это необходимо, выходные сигналы ее элементов  $y_i(t)$ .

Анализ нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений связан со значительными трудностями, поэтому везде, где это возможно уравнения (2.12) преобразуют к виду:

$$\begin{aligned} a_{ni} y_i(n)(t) + \dots + a_{1i} y_i(1)(t) + a_{0i} y_i(t) = \\ = b_{vi} x_i(m)(t) + \dots + b_{1i} x_i(1)(t) + b_{0i} x_i(t), \end{aligned}$$

Это уравнение представляет собой сумму линейных стационарных операторов, поэтому само является линейным и стационарным и будет в дальнейшем широко использоваться.

### 2.3 ПОНЯТИЕ О СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ САУ

Исследование свойств САУ предусматривает следующие этапы:

- 1) Оценка устойчивости.
- 2) Исследование установившихся режимов САУ.
- 3) Анализ качества перехода САУ из одного состояния в другое.

Устойчивой называется САУ, которая может занять любое желаемое состояние и находиться в нем при отсутствии возмущений.

Процесс перехода САУ из одного состояния в другое называется переходным процессом (ПП).

Установившемся называется режим, наступающий после завершения ПП.

Зависимость между входным и выходным сигналами в установившемся режиме называется статической.

Статические характеристики разделяются на линейные и нелинейные. Линейными называются только статические характеристики, описываемые уравнением

$$y = a \cdot x + b,$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные величины. Значение производной  $dy/dx$  в какой-либо точке статической характеристики называется коэффициентом усиления в этой точке.

Характеристики поведения САУ в ПП называются динамическими.

Исследование перехода САУ из одного состояния в другое желательно проводить под действием таких входных воздействий, чтобы в ПП наиболее полно проявлялись свойства САУ. Такие входные воздействия называются типовыми. Типовые входные воздействия

В теории управления широко используются следующие входные воздействия: степенные, импульсные, гармонические.

## 2.4 ЕДИНИЧНАЯ СТУПЕНЧАТАЯ ФУНКЦИЯ

Единичной ступенчатой называется функция (см. рис.2.1,а), удовлетворяющая условиям:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \forall t < 0, \\ 1 & \forall t \geq 0. \end{cases}$$

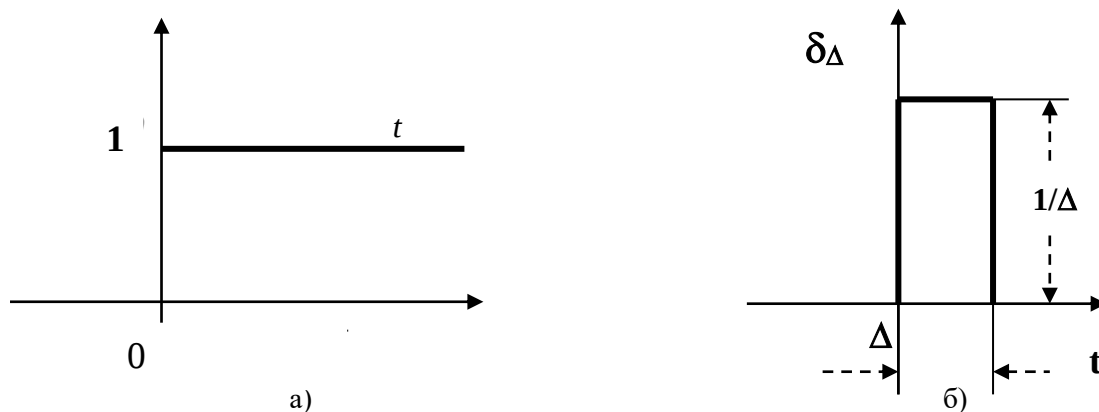


Рис.2.1. Типовые входные воздействия:

а) единичное ступенчатое; б) импульсное

Определим преобразование Лапласа единичной ступенчатой функции, которое широко используется в дальнейшем:

$$L[1(t)] = \int_0^{\infty} 1(t) \cdot e^{-pt} dt = -\frac{1}{p} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{p}.$$

## 2.5 ЕДИНИЧНЫЙ ИМПУЛЬС

Единичным импульсом (“дельта”функцией, функцией Дирака) называется функция, удовлетворяющая условиям:

$$\int_0^t \delta(\tau) d\tau = 1; \quad \delta(t) = \begin{cases} 0 & \forall t \neq 0, \\ \infty & \forall t = 0. \end{cases}$$

Эта функция является математической абстракцией, но ее применение позволяет математически описать очень важные свойства САУ. Ее можно представить как предел прямоугольного импульса:  $\delta(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta_{\Delta}(t)$ .

Свойства  $\delta$ -функции (без доказательства):

$$\int_0^t f(\tau) \cdot \delta(t - T) \cdot d\tau = f(T) \quad \forall \quad 0 \leq t \leq T.$$

$$L[\delta(t)] = 1.$$

$$\frac{d1(t)}{dt} = \delta(t) \quad - \text{ по определению.}$$

## 2.6 ГАРМОНИЧЕСКИЙ ВХОДНОЙ СИГНАЛ

Гармонический входной сигнал имеет вид:

$$x(t) = A_x \sin(\omega t + \varphi_x),$$

где  $A_x$  - амплитуда входного сигнала;  $\omega$  - круговая частота (рад/с);  $\varphi_x$  — начальная фаза (рад).

Так как свойства САУ не зависят от  $\varphi_x$ , то обычно принимается

$$\varphi_x = 0.$$

Часто используют гармонический входной сигнал в комплексной форме:

$$x(t) = A_x e^{j(\omega t + \varphi_x)} = A_x [\cos(\omega t + \varphi_x) + j \sin(\omega t + \varphi_x)].$$

Рассмотренные выше типовые сигналы применяются при исследовании как непрерывных, так и дискретных САУ. Определение выходных сигналов САУ при этом в классической теории управления основано на использовании передаточных функций.

## 2.7 ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИЯ

Переходной функцией САУ называется ее реакция на единичный ступенчатый сигнал при нулевых начальных условиях.

Переходная функция характеризует переход системы из одного равновесного состояния в другое. Ее изображение по Лапласу

$$H(p) = L[h(t)] = W(p) \cdot L[1(t)] = \frac{B(p)}{p \cdot A(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + \dots + a_1 p + 1}.$$

Если корни характеристического уравнения  $A(p) = 0$  различные и ненулевые, то в соответствии с теоремой разложения

$$h(t) = L^{-1}[H(p)] = \sum_{i=1}^{n+1} c_i e^{p_i t},$$

$$\text{где } c_i = \left. \frac{B(p)}{[pA(p)]} \right|_{p=p_i},$$

$$p_i - \text{ корни уравнения } pA(p) = 0, \quad i = \overline{1, n+1}.$$

Основные свойства

$$1) \quad h(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p H(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{B(p)}{A(p)} = 0, \quad \forall m < n.$$

$$h(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0}{a_0}.$$

Это справедливо только для случая, когда  $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) \neq \infty$ . 3) Основные характеристики  $h(t)$  определим из рис.2. К ним относятся время регулирования  $t_p$  и перерегулирование  $\sigma$ .

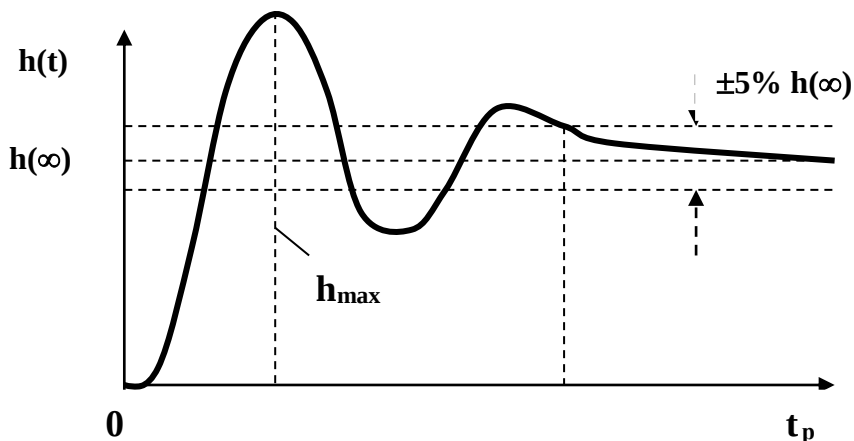


Рис. 2.2. Переходная характеристика  $h(t)$

Временем регулирования называется момент времени  $t_p$ , когда график переходной функции  $h(t)$  входит в “трубку”  $\pm 5\% h(\infty)$  и в дальнейшем не выходит из нее.

Т.е. считается, что переходный процесс заканчивается в момент времени  $t_p$ . Можно определить время регулирования еще как время перехода САУ из одного состояния в другое с заданной точностью

Перерегулирование — это величина, определяемая формулой:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} 100 \%$$

Если  $h_{\max} = h(\infty)$ , то принимается  $\sigma = 0\%$ .

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.

1. Перечислите основные структурные элементы систем автоматического управления?
2. Приведите примеры входных и выходных сигналов в САУ?
3. Какой вид имеют статические характеристики линейных систем?
4. Какие объекты называются объектами с самовыравниванием?
5. Чем вызвано применение различных динамических характеристик?
6. Как получить передаточную функцию системы, если для нее известно дифференциальное уравнение?

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

### ЛЕКЦИЯ 3

#### ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

##### 3.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕНЬЕВ

Русский ученый Михайлов А.С. в 1938 г. предложил удобный аппарат исследования САУ: расчленение ПФ САУ на звенья. Звеном называется часть САУ, оператор которой описывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка:

$$a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_2 \ddot{x}(t) + b_1 \dot{x}(t) + b_0 x(t)$$

или

$$(a_2 p^2 + a_1 p + a_0)Y(p) = (b_2 p^2 + b_1 p + b_0)X(p)$$

Приведем последнее уравнение к стандартному виду (коэффициенты при  $p$  должны быть равны единице):

$$a_0 \left( \frac{a_2}{a_0} p^2 + \frac{a_1}{a_0} p + 1 \right) Y(p) = b_0 \left( \frac{b_2}{b_0} p^2 + \frac{b_1}{b_0} p + 1 \right) X(p)$$

Обозначим

$$k = \frac{b_0}{a_0}, \quad T_a = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}, \quad 2T_a \xi_a = \frac{a_1}{a_0}, \quad T_b = \sqrt{\frac{b_2}{b_0}}, \quad 2T_b \xi_b = \frac{b_1}{b_0}.$$

**Таблица 1.**

| №<br>п/п | W(p)                              | Название звена                                                                                                                                                        |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | k                                 | усилительное звено                                                                                                                                                    |
| 2        | kp                                | идеальное дифференцирующее                                                                                                                                            |
| 3        | $\frac{k}{p}$                     | идеальное интегрирующее                                                                                                                                               |
| 4        | $k(Tp + 1)$                       | форсирующее 1-го порядка                                                                                                                                              |
| 5        | $k(T^2 p^2 + 2T\xi p + 1)$        | форсирующее 2-го порядка                                                                                                                                              |
| 6        | $\frac{k}{Tp + 1}$                | апериодическое (инерционное 1-го порядка)                                                                                                                             |
| 7        | $\frac{k(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}$  | апериодическое с введением производной                                                                                                                                |
| 8        | $\frac{kp}{Tp + 1}$               | реальное дифференцирующее (изодром)                                                                                                                                   |
| 9        | $\frac{k}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$ | инерционное 2-го порядка:<br>$0 < \xi < 1$ – колебательное;<br>$\xi \geq 0$ – апериодическое 2-го порядка;<br>$\xi = 0$ – консервативное;<br>$\xi < 0$ – неустойчивое |
| 10       | $k \exp(-p\tau_n)$                | звено с запаздыванием $\tau_n$                                                                                                                                        |

Тогда

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k(T_b^2 p^2 + 2T_b \xi_b p + 1)}{T_a^2 p^2 + 2T_a \xi_a p + 1} = \frac{kB(p)}{A(p)}. \quad (1)$$

Параметры  $T_a$ ,  $T_b$  называются постоянными времени звена,  $\xi_a$ ,  $\xi_b$  – относительными коэффициентами затухания,  $k$  – коэффициентом усиления. Полином  $B(p)$  отражает форсирующие свойства звена, а  $A(p)$  – инерционные. Классификация звеньев по виду ПФ (1) представлена в таблице 1.

Звенья №№ 1-3 называются идеальными, а остальные – реальными (динамическими).

### 3.2 ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕНЬЕВ САУ

С момента воздействия  $x(t)$  на вход системы, управляемая величина  $y(t)$  начинает изменяться. Процесс, происходящий в это время, называют переходным. Аналитическая зависимость  $y(t)$ , описывающая переходной процесс, называется переходной функцией. Будет система управляться лучше или хуже – зависит от переходной функции.

Переходной процесс обуславливается внутренними свойствами системы и видом воздействия. Чтобы иметь возможность сравнивать переходные процессы разных систем, принято оказывать воздействие в виде единичной ступенчатой функции при нулевых начальных условиях. Переходную функцию обозначают  $h(t)$ .

Первую производную от переходной функции называют весовой функцией и обозначают  $w(t)$ .

### 3.3 УСИЛИТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО

- 1) Запишем передаточную функцию и уравнение усилительного звена:

$$W(p) = k, \quad x(t) = ky(t),$$

где параметр  $k$  называется коэффициентом усиления звена.

- 2) Переходная и весовая функция звена имеют вид:

$$h(t) = k1(t), \quad g(t) = \frac{dh(t)}{dt} = k\delta(t).$$

Показатели качества переходной функции усилительного звена: перерегулирование  $\sigma = 0$  и время регулирования  $t_p = 0$ .

Примеры усилительного звена: зубчатая передача, рычаг, электронный усилитель, линейный потенциометр.

### 3.4 ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО

- 1) Запишем передаточную функцию и уравнение дифференцирующего звена:

$$W(p) = kp; \quad y(t) = k \dot{x}(t),$$

где параметр  $k$  – коэффициент усиления звена.

- 2) Переходная звена имеют вид:

$$h(t) = k \frac{d1(t)}{dt} = \delta(t).$$

Для получения весовой функции пришлось бы ввести определение производной от  $\delta$  – импульса.

Пусть на вход дифференцирующего звена подается гармонический сигнал  $x(t) = Ax \sin \omega t$ , где  $Ax$  – амплитуда,  $\omega$  – частота.

Выходной сигнал в этом случае  $y(t) = k Ax \omega \cos \omega t$ . Известно, что мощность сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды:  $k^2 Ax^2 \omega^2$ , поэтому она неограниченно возрастает с увеличением частоты. Мощность любого устройства

ограничена, поэтому данное звено в чистом виде нереализуемо. Это справедливо для любой системы, у которой степень числителя больше степени знаменателя передаточной функции.

### 3.5 ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО

- 1) Запишем передаточную функцию и уравнение интегрирующего звена:

$$W(p) = \frac{k}{p}; \quad y(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau,$$

где параметр **k** - коэффициент усиления звена.

- 2) Переходная и весовая функция звена имеют вид:

$$h(t) = k \int_0^t 1(\tau) d\tau = kt; \quad g(t) = k \int_0^t \delta(\tau) d\tau = k \cdot 1(t).$$

Функция **h(t)** при неограниченном увеличении **t** стремится к бесконечности. Длительность переходного процесса также равна бесконечности. Графики переходных и весовых функций идеальных звеньев предлагается построить самостоятельно.

Примеры интегрирующего звена: редуктор (если вход – угловая скорость входного вала, выход – угол поворота выходного вала), конденсатор (вход – ток, выход – напряжение), через интегрирующее звено связаны между собой уровень жидкости в баке со скоростью подачи жидкости в бак; пройденный самолетом, автомобилем путь с постоянной линейной скоростью и т.д.

### 3.6 АПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЗВЕНО

- 1) Запишем передаточную функцию и уравнение аperiodического звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{Tp + 1},$$

$$T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = k \cdot x(t).$$

где **k** - коэффициент усиления, **T** - постоянная времени звена, измеряемая в секундах.

- 2) Для определения переходной и весовой функции звена используем метод преобразования Лапласа. Изображение по Лапласу переходной функции аperiodического звена

$$H(p) = W(p) \cdot L[1(t)] = W(p) \cdot \frac{1}{p} = \frac{k}{p \cdot (Tp + 1)}.$$

Для определения оригинала **h(t)** целесообразно использовать таблицу преобразований Лапласа, для чего приведем ее изображение к табличному виду:

$$H(p) = k \frac{a}{p \cdot (p + a)}, \quad a = \frac{1}{T},$$

и по таблице находим переходную функцию рассматриваемого звена:

$$h(t) = k \cdot (1 - e^{-at}) \quad \text{или} \quad h(t) = k \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

- 3) График функции **h(t)** представлен на рис1.

- 4) Весовую функцию определяем по формуле

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

- 5) Свойства переходной функции аperiodического звена:

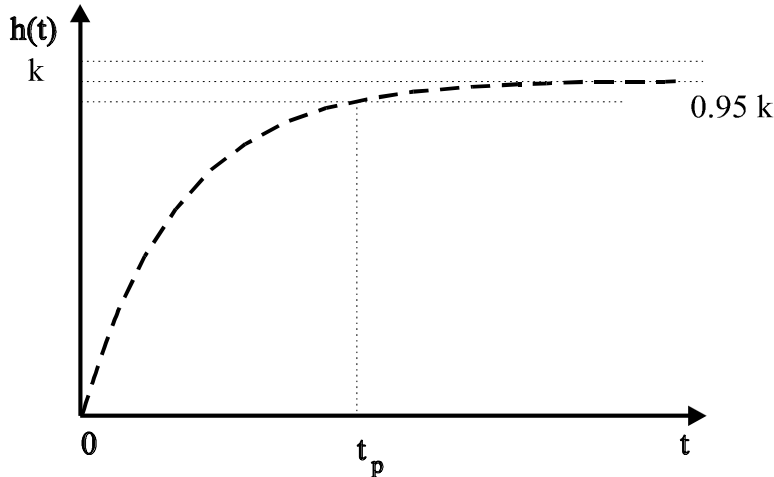


Рис.3.1. График переходной функции аperiodического звена

**Свойство 1.** Установившееся значение переходной функции звена равно его коэффициенту усиления **k**. (Доказать самостоятельно).

**Свойство 2.** Для аperiodического звена время регулирования равно трем постоянным времени:  $t_p \approx 3 T$ .

Действительно, в соответствии с рис1. время регулирования можно определить из условия:

$$h(t_p) = k \cdot (1 - e^{-\frac{t_p}{T}}) = 0.95 \cdot k.$$

Преобразуя это условие, получим:

$$e^{-\frac{t_p}{T}} = 0.05 \quad \text{или} \quad \ln(e^{-\frac{t_p}{T}}) = \ln 0.05 \quad \text{или} \quad -\frac{t_p}{T} \cong -3.$$

Таким образом,  $t_p \approx 3 T$ , что и требовалось доказать.

**Свойство 3.** Для аperiodического звена перерегулирование  $\sigma = 0$ .

Примеры аperiodических звеньев: магнитный усилитель, цепочка **РС**, электродвигатель постоянного тока (если вход – напряжение, а выход – угловая скорость ротора), автомобиль (вход – ход педали газа, выход – скорость автомобиля), тепловая камера (вход – расход пара в калорифере, выход – температура в камере).

### 3.7 КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО

Передаточная функция колебательного звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{T_0^2 p^2 + 2T_0 \xi p + 1} = \frac{k \Omega_0^2}{p^2 + 2\Omega_0 \xi p + \Omega_0^2}, \quad (3.1)$$

$$0 < \xi < 1, \quad \Omega_0 = 1/T_0.$$

Определим изображение по Лапласу его переходной функции:

$$H(p) = W(p)L[1(t)] = W(p) \frac{1}{p} = \frac{k}{p(T_0^2 p^2 + 2T_0 \xi p + 1)}.$$

В соответствии с теоремой разложения

$$h(t) = c_0 e^{p_0 t} + c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t}, \quad (3.2)$$

где  $p_0, p_1, p_2$  - корни уравнения

$$p(T_0^2 p^2 + 2T_0 \xi p + 1) = 0 \quad (3.3)$$

равны  $p_0=0$ ,  $p_{1,2} = \frac{-\xi T_0 \pm \sqrt{(\xi T_0)^2 - T_0^2}}{T_0^2} = -\frac{\xi}{T_0} \pm j \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0}$

или  $p_0=0$ ,  $p_{1,2} = \lambda \pm j\omega$ , ( 3.4 )

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\lambda = -\xi/T_0$ ,  $\omega = \sqrt{1-\xi^2}/T_0$ .

Формула ( 3.4 ) принимает вид:

$$h(t) = c_0 + c_1 e^{(\lambda+j\omega)t} + c_2 e^{(\lambda-j\omega)t}.$$

Так как  $e^{j\omega t} = \sin \omega t + j \cos \omega t$ , можно записать

$$h(t) = c_0 + e^{\lambda t} (\tilde{c}_1 \sin \omega t + \tilde{c}_2 \cos \omega t). \quad ( 3.5 )$$

Для определения коэффициентов формулы ( 3.5) найдем также

$$\frac{dh}{dt} = \lambda e^{\lambda t} \tilde{c}_1 \sin \omega t + e^{\lambda t} \tilde{c}_1 \omega \cos \omega t + \lambda e^{\lambda t} \tilde{c}_2 \cos \omega t - e^{\lambda t} \tilde{c}_2 \omega \sin \omega t.$$

Теперь запишем следующую систему уравнений:

$$\frac{dh}{dt}(0) = \tilde{c}_1 \omega + \lambda \tilde{c}_2 = 0;$$

$$h(0) = c_0 + \tilde{c}_2 = 0;$$

$$h(\infty) = c_0 = \lim_{p \rightarrow 0} p H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} W(p) = k.$$

Отсюда определяем

$$c_0=k; \quad \tilde{c}_2 = -k;$$

$$\tilde{c}_1 = -\lambda \tilde{c}_2 / \omega = -k \xi / T_0 / (\sqrt{1-\xi^2} / T_0) = \frac{-k \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad ( 3.6 )$$

тогда из ( 3.5 ) следует, что  $h(t) = k(1 - e^{\lambda t} (\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega t + \cos \omega t))$

Учитывая, что  $a \sin \omega t + b \cos \omega t = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\omega t + \varphi_0)$ ,  $\sin \varphi_0 = b / \sqrt{a^2 + b^2}$ , получим:

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{1 + \frac{\xi^2}{1-\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad \sin \varphi_0 = \sqrt{1-\xi^2}.$$

Таким образом, переходная функция колебательного звена имеет вид:

$$h(t) = k[1 - \frac{e^{\lambda t}}{\sin \varphi_0} \sin(\omega t + \varphi_0)], \quad ( 3.7 )$$

где  $\sin \varphi_0 = \sqrt{1-\xi^2}$ .

График переходной функции устойчивого колебательного звена представлен на рис.3.2. Его коэффициент усиления, как и у апериодического, определяется по формуле  $k = h(\infty)$ . ( 3.8 )

Измерив расстояние по оси времени между двумя любыми соседними максимумами, можно найти период вынужденных колебаний  $T = t_{\max 2} - t_{\max 1}$  и, следовательно, и угловую частоту этих колебаний:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad ( 3.9 )$$

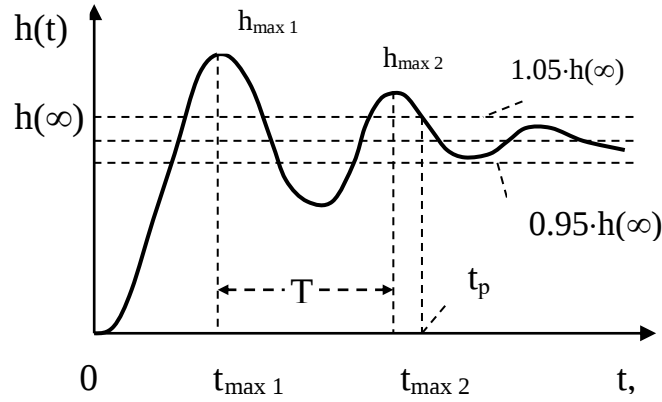


Рис.3.2. Переходная функция устойчивого колебательного звена

Измерив расстояние по оси времени между двумя любыми соседними максимумами, можно найти период вынужденных колебаний  $T = t_{\max 2} - t_{\max 1}$  и, следовательно, и угловую частоту этих колебаний:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (3.10)$$

Как известно,

$$t_{\max 1} = T/2 \quad \text{или} \quad T = 2t_{\max 1}. \quad (3.11)$$

На практике для определения периода колебаний  $T$  удобнее пользоваться именно этой формулой. С ее использованием несложно получить следующую зависимость:

$$\lambda = \frac{\ln \bar{\sigma}}{t_{\max 1}}, \quad \text{где} \quad \bar{\sigma} = \frac{h_{\max 1} - h(\infty)}{h(\infty)}. \quad (3.12)$$

Действительно

$$\begin{aligned} h_{\max 1} &= k[1 - \frac{e^{\lambda t_{\max 1}}}{\sin \varphi_0} \sin(\omega t_{\max 1} + \varphi_0)] = h(\infty)[1 - \frac{e^{\lambda t_{\max 1}}}{\sin \varphi_0} \sin(\omega \frac{T}{2} + \varphi_0)] = \\ &= h(\infty)[1 - \frac{e^{\lambda t_{\max 1}}}{\sin \varphi_0} \sin(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{2} + \varphi_0)] = |\sin(\varphi_0 + \pi) = -\sin \varphi_0| = \\ &= h(\infty)[1 + e^{\lambda t_{\max 1}}]. \end{aligned}$$

Отсюда

$$h_{\max 1} - h(\infty) = h(\infty)e^{\lambda t_{\max 1}} \quad \text{или} \quad \bar{\sigma} = \frac{h_{\max 1} - h(\infty)}{h(\infty)} = e^{\lambda t_{\max 1}}.$$

Логарифмируя последнее выражение, получим формулу (3.12).

Зная действительную  $\lambda$  и мнимую  $\omega$  части корней уравнения (3.2), можно вычислить искомые параметры передаточной функции (3.1):

$$T_0 = 1/\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}; \quad \xi = -\lambda T_0. \quad (3.13)$$

Формулы (3.11) - (3.13) используются для экспериментального определения параметров колебательного звена.

Величина относительного коэффициента затухания  $\xi$  существенно влияет на динамические характеристики колебательного звена. Графики его переходных функций при фиксированном значении постоянной времени  $T$  и различных значениях  $\xi$  приведены на рис.3.3.

Зависимости относительного времени регулирования  $t_p/T$  и перерегулирования  $\sigma$  от  $\xi$  предлагается определить экспериментально с помощью ЭВМ. Необходимо показать, что оптимальное значение

$$\xi_{\text{opt}} = 0.707.$$

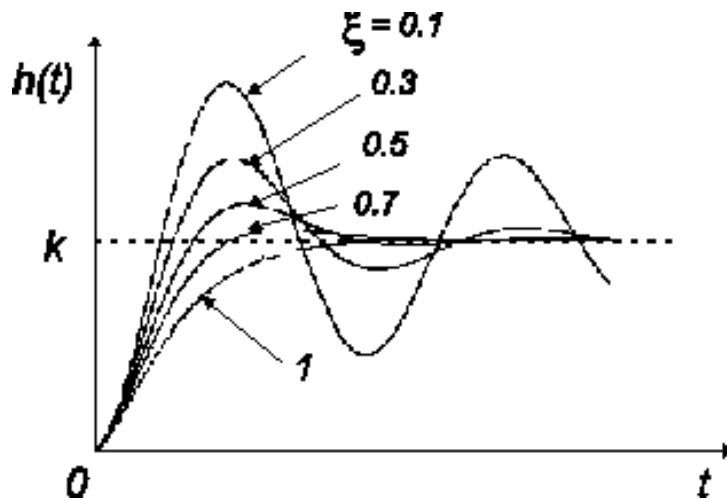


Рис.3.3. Переходные функции колебательного звена

Переходные процессы в этом случае характеризуются минимальным временем регулирования  $t_p = 2.9 T$  и малым перерегулированием  $\sigma < 5\%$ .

С увеличением постоянной времени  $T$  затухание переходной функции уменьшается время регулирования увеличивается.

Примеры колебательных звеньев: любая механическая система, движущаяся под действием сил инерции, жесткости и демпфирования (автомобиль на пружинном подвесе с амортизаторами, механические весы), электрические цепи, включающие активное сопротивление, емкость и индуктивность. Общее у этих объектов одно: все они описываются дифференциальными уравнениями второго порядка.

### 3.8 ЗАПАЗДЫВАНИЕ В САУ

Существуют передающие звенья в САУ (трубопроводы в гидравлических системах, электрические длинные линии, транспортеры, реле как усилитель), которые аналогично усилительным звеньям воспроизводят входные сигналы без искажения за исключением того, что все значения выходного сигнала запаздывают на время  $\tau$  по отношению к входному сигналу:

$$y(t) = k \cdot x(t - \tau), \quad y(t) = 0 \quad \forall t < \tau.$$

Указанные свойства моделируются в САУ введением звена запаздывания. Переходная и весовая функции звена запаздывания имеют вид:

$$h(t) = k \cdot 1(t - \tau), \quad g(t) = k \cdot \delta(t - \tau).$$

Их графики представлены на рис.3.4.

Нетрудно показать, что передаточная функция звена запаздывания будет иметь вид:

$$W(p) = k \cdot e^{-p\tau}.$$

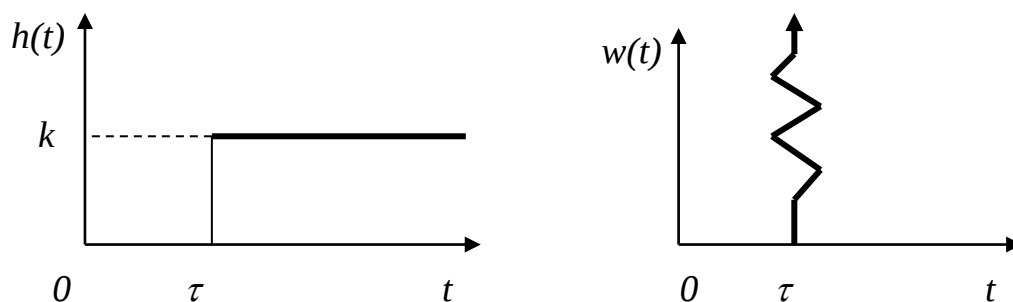


Рис.3.4. Переходная и весовая функция звена запаздывания

В заключение следует отметить, что представление реальных систем и их элементов в виде звеньев, также как описание их движения дифференциальными уравнениями никогда не является абсолютно точным. Более того, в зависимости от условий исследования одна и та же САУ может описываться разными дифференциальными уравнениями, а, следовательно, различной совокупностью элементарных звеньев.

### 3.9 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

Структурная схема последовательного соединения звеньев представлена на рис.3.5.

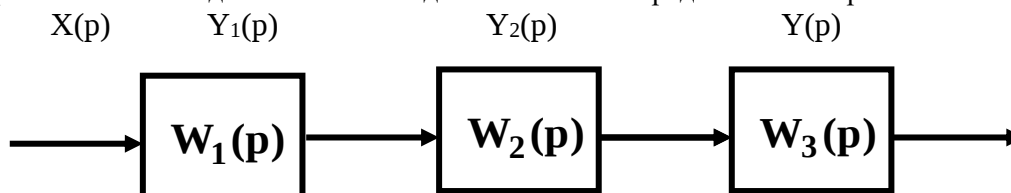


Рис.3.5. Последовательное соединение звеньев

Запишем уравнения звеньев, вытекающие из структурной схемы:

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

$$Y_2(p) = W_2(p) \times Y_1(p);$$

$$Y(p) = W_3(p) \times Y_2(p).$$

Последовательно исключая промежуточные переменные, получим:

$$Y_2(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot X(p);$$

$$Y(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot X(p).$$

Таким образом, ПФ последовательного соединения звеньев САУ равна произведению их ПФ:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (3.14)$$

### 3.10 ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

Структурная схема параллельного соединения звеньев представлена на рис.3.6.

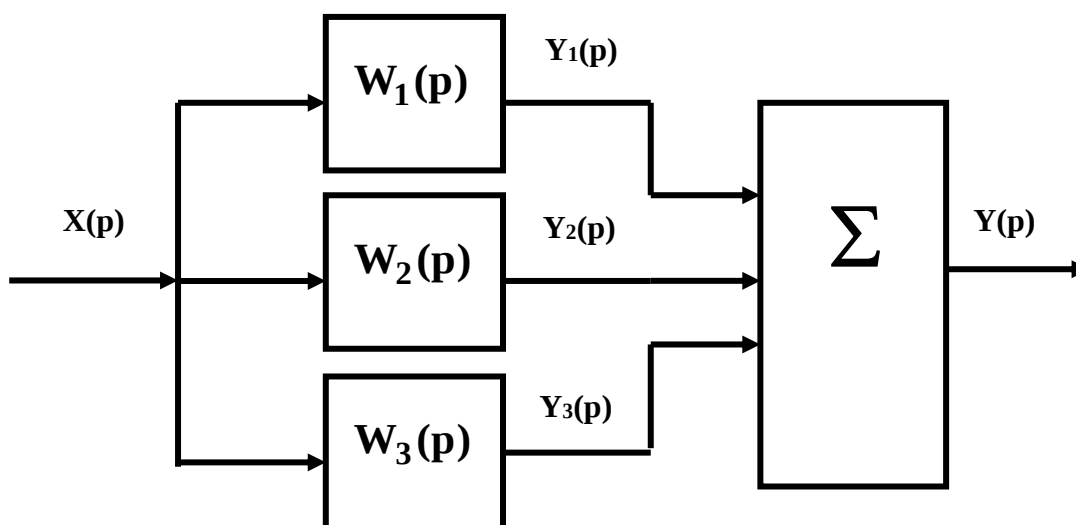


Рис.3.6. Параллельное соединение звеньев

Выходной сигнал, полученный на выходе сумматора:

$$Y(p) = Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p),$$

или  $Y(p) = [W_1(p) + W_2(p) + W_3(p)] \cdot X(p)$ .

Таким образом, ПФ параллельного соединения звеньев равна сумме их ПФ:

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (3.15)$$

### 3.11 ВСТРЕЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

Структурная схема встречно-параллельного соединения звеньев (с обратной связью) изображена на рис.3.7.

В данном примере обратная связь – отрицательная. Уравнения звеньев этой САУ в соответствии со структурной схемой имеют вид:

$$\varepsilon(p) = X(p) - Y(p);$$

$$Y(p) = W_1(p) \varepsilon(p);$$

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

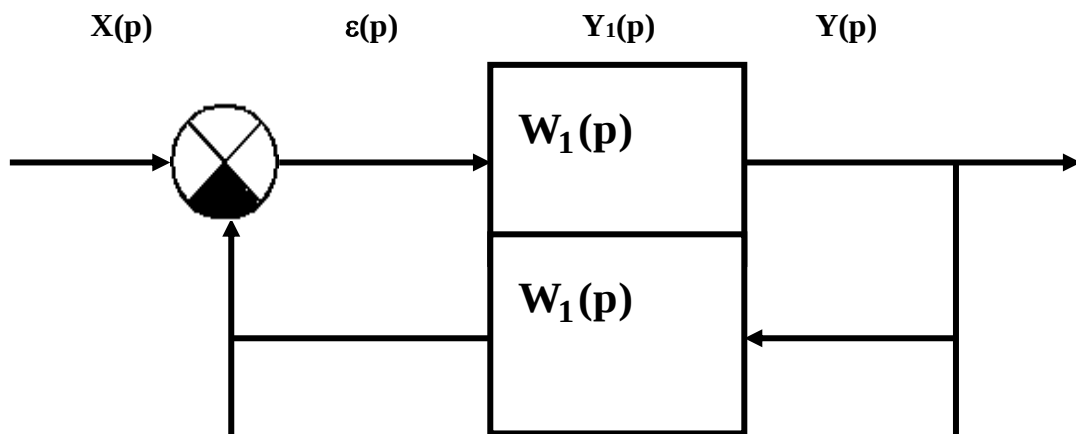


Рис.3.7. Встречно-параллельное соединение звеньев

Из первого и второго уравнений, исключив  $\varepsilon(p)$ , получим:

$$Y(p) = W_1(p) [X(p) - Y_1(p)];$$

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

Из полученной системы исключаем  $Y_1(p)$ :

$$Y(p) = W_1(p) [X(p) - W_2(p)Y(p)].$$

Преобразуя полученное уравнение, получаем ПФ встречно-параллельного соединения звеньев с отрицательной обратной связью:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}. \quad (3.16)$$

Предлагается доказать самостоятельно, что ПФ встречно-параллельного соединения звеньев с положительной обратной связью

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)}.$$

### 3.12 ПОНЯТИЕ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ САУ

Устойчивость САУ является необходимым условием ее работоспособности. В механике хорошо известно понятие устойчивости системы относительно состояния покоя. На рис.3.8. показаны три состояния равновесия шарика.

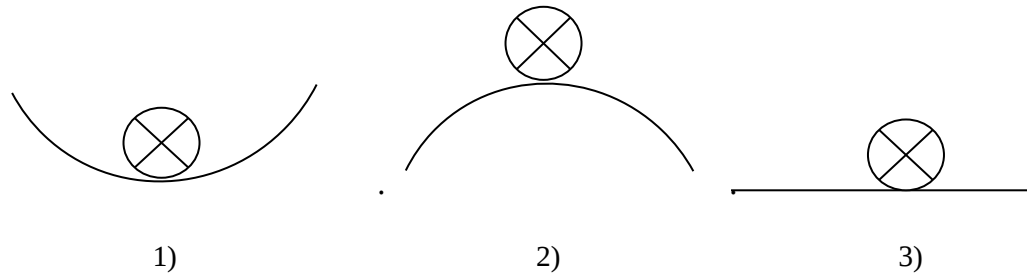


Рис.3.8. Состояния равновесия в механике

Если вывести шарик из состояния равновесия, то только во 1-ом случае он вернется в исходное состояние равновесия, называемое устойчивым. Состояния равновесия 1 - устойчивое, 2 - неустойчивое, 3 - нейтральное.

Для САУ состояние покоя не свойственно, она в процессе работы всегда включена, т.е. находится в движении. Что здесь понимать под устойчивостью?

Основоположителем учения об устойчивости движения является выдающийся русский математик и механик А.М.Ляпунов. Рассмотрим понятие устойчивости движения применительно к САУ. А.М.Ляпунов в качестве аналога состоянию покоя в механике выбрал невозмущенное движение.

Невозмущенным называется движение САУ при отсутствии возмущений.

САУ называется устойчивой, если она, будучи выведенной из состояния невозмущенного движения некоторым возмущением, приходит вновь в это состояние или близкое к нему после прекращения действия этого возмущения.

САУ называется асимптотически устойчивой, если при указанных выше условиях она приходит строго в исходное состояние.

В дальнейшем под устойчивостью будем понимать асимптотическую устойчивость по Ляпунову. При рассмотрении этого вопроса будем считать, что процессы в САУ описываются линейными стационарными дифференциальными уравнениями, записанными в отклонениях от невозмущенного движения. Под действием возмущений эти отклонения становятся отличными от нуля. После прекращения действия возмущений что является причиной движения в САУ? - Накопленные к этому времени отклонения, которые можно принять как ненулевые начальные условия в дифференциальных уравнениях САУ, используемых при анализе устойчивости.

Проанализируем особенности этого движения.

Повторение: Вспомним особенности преобразования Лапласа при ненулевых начальных условиях:  $y(0) \neq 0$ ;  $y'(0) \neq 0$ ; ... ,  $y^{(n-1)}(0) \neq 0$ :

$$\begin{aligned} L[y'(t)] &= p Y(p) - y(0); \\ L[y''(t)] &= p^2 Y(p) - p y(0) - y'(0); \\ L[y^{(n)}(t)] &= p^n Y(p) - p^{n-1} y(0) - \dots - y^{(n-1)}(0). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Этот вопрос рассмотрим на примере САУ второго порядка при условии  $x(t)=0$ ;  $f(t)=0$ . Уравнение движения в этом случае имеют вид:

$$a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = 0.$$

Осуществив преобразование Лапласа этого уравнения с учетом формул (3.17), получим:

$$\begin{aligned} a_2 [p^2 Y(p) - p y(0) - y'(0)] + a_1 [p Y(p) - y(0)] + a_0 Y(p) &= 0, \\ \text{или } [a_2 p^2 + a_1 p + a_0] Y(p) &= a_2 y(0) p + [a_2 y'(0) + a_1 y(0)]. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Откуда  $Y(p) = N(p)/A(p)$ , где  $A(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0$  - характеристический полином системы;

$N(p) = n_1 p + n_0 = a_2 x(0) p + [a_2 x'(0) + a_1 x(0)]$ . Полученный результат справедлив и для системы n-го порядка.

#### 4.3. Необходимые и достаточные условия устойчивости САУ

Итак изображение по Лапласу выходного сигнала САУ после прекращения действия возмущения имеет вид (2). Пусть корни характеристического уравнения  $A(p) = 0$  САУ  $n$ -го порядка различные. Найдем оригинал  $y(t)$ , используя теорему разложения:

$$y(t) = L_{-1}[Y(p)] = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t} + \dots + c_n e^{p_n t}. \quad (3.19)$$

где  $p_i$  – корни уравнения  $A(p) = 0$ ,  $p_i = \overline{1, n}$ ,

$$c_i = \frac{N(p)}{A'(p)} \Big|_{p=p_i}, \quad A'(p) = \frac{dA(p)}{dp}.$$

САУ устойчива по Ляпунову, если выполняется условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (3.20)$$

Анализируя выражения (3.19), (3.20), легко доказать следующее условие устойчивости:

Для того, чтобы линейная стационарная САУ была асимптотически устойчивой по Ляпунову необходимо и достаточно, чтобы корни ее характеристического уравнения имели отрицательные действительные части (находились слева от мнимой оси на комплексной плоскости).

При линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений делаются определенные допущения и упрощения. Возникает вопрос можно ли линеаризованные уравнения использовать для анализа устойчивости реальных САУ? Не окажут ли в этом случае существенное влияние факторы, которыми мы пренебрегали?

А.М.Ляпунов доказал, что необходимое и достаточное условие устойчивости линеаризованных САУ справедливо и для исходных нелинейных систем независимо от значения отбрасываемых при линеаризации членов высших порядков. Конечно, это справедливо только при малых возмущениях и отклонениях, когда допустима линеаризация.

Если часть корней характеристического уравнения САУ находятся на мнимой оси, а все остальные корни расположены в левой полуплоскости, то говорят, что САУ находится на границе устойчивости (строго говоря, это утверждение справедливо только для некрратных корней).

Примеры расположения корней на комплексной плоскости приведены на рис.3.9.

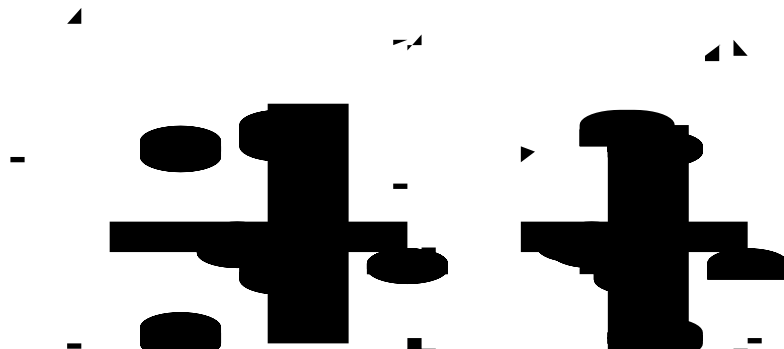


Рис.3.9. Расположение корней САУ: а) устойчивой; б) нейтральной; в) неустойчивой.

Таким образом, для оценки устойчивости необходимо определить корни характеристического уравнения, что при  $n > 2$  является сложной вычислительной

задачей. Поэтому в теории управления уделено много внимания критериям оценки устойчивости, не требующим вычисления корней. К ним относятся алгебраический критерий устойчивости Гурвица и частотный критерий Найквиста- Михайлова.

Грубую, но наиболее простую оценку устойчивости дает необходимое условие устойчивости.

### 3.13 АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ

Необходимое условие устойчивости

Пусть характеристический полином САУ имеет вид

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0. \quad (3.21)$$

Представим его в виде произведения биномов:

$$A(p) = a_n (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n),$$

где  $p_i$  корни характеристического уравнения  $A(p) = 0$ . Если САУ устойчива, то все корни этого уравнения имеют отрицательные действительные части.

Пусть  $p_1 = -\alpha$ , где  $\alpha > 0$  - действительное число, тогда двучлен

$$p - p_1 = p + \alpha$$

будет иметь положительные коэффициенты: +1 и + $\alpha$ .

Если корни комплексно-сопряженные:

$$p_1 = -\alpha + j\beta; \quad p_2 = -\alpha - j\beta; \quad \alpha > 0; \quad \beta > 0,$$

$$\text{тогда } (p - p_1)(p - p_2) = (p + \alpha - j\beta)(p + \alpha + j\beta) =$$

$$= p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \beta^2,$$

т.е. и в этом случае получили полином с положительными коэффициентами. Таким образом, полином  $A(p)$ , равный произведению полиномов с положительными коэффициентами, будет также иметь положительные коэффициенты. Сформулируем необходимое условие устойчивости:

Если линейная стационарная САУ устойчива, то все коэффициенты её характеристического полинома (5) больше нуля.

Из этого условия следует, что

1) если хотя бы один из коэффициентов характеристического

полинома  $a_i \leq 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то система устойчивой быть не может;

2) если все коэффициенты  $a_i > 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  то факт устойчивости необходимо дополнительно исследовать.

Рассмотрим примеры характеристических полиномов трех САУ:

$$1) A(p) = p^3 - 3p^2 + 2p + 1; \quad \text{САУ неустойчива, так как } a_2 < 0.$$

$$2) A(p) = p^3 + 4p + 4; \quad \text{САУ неустойчива, так как } a_2 = 0.$$

3)  $A(p) = p^3 + p^2 + 4p + 20$ ; все  $a_i > 0$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , поэтому устойчивость САУ необходимо исследовать с помощью других критериев.

Критерий устойчивости Гурвица

Алгебраический критерий устойчивости Гурвица определяет необходимые и достаточные условия устойчивости линейных стационарных САУ без вычисления корней характеристического уравнения:

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0, \quad a_n > 0. \quad (3.22)$$

Условия устойчивости оцениваются с помощью квадратной матрицы, размерность которой равна размерности полинома  $A(p)$ :  $n$ .

Матрица Гурвица формируется следующим образом:

1) На главной диагонали записываются коэффициенты полинома  $A(p)$ :  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$  в порядке увеличения индексов сверху вниз и слева направо.

Строки заполняются коэффициентами  $a_i$  в порядке убывания индексов слева направо, при этом принимается, что  $a_i = 0$ , при  $i < 0$  и  $i > n$ .

Таким образом, матрица Гурвица принимает вид:

$$R = \begin{bmatrix} a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_{n-3} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & a_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Выделим диагональные подматрицы матрицы  $R$  различной размерности:

$$R_1 = [a_{n-1}]; \quad R_2 = \begin{bmatrix} a_{n-2} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-1} \end{bmatrix}; \quad \dots; \quad R_n = R.$$

Критерий Гурвица формулируется следующим образом:

Для того, чтобы корни характеристического уравнения (3.22) при  $a_i > 0$  имели отрицательные действительные части, необходимо и достаточно, чтобы определители всех диагональных подматриц матрицы Гурвица были положительными:

$$|R_1| > 0; \quad |R_2| > 0; \quad \dots; \quad |R_n| > 0.$$

Критерии устойчивости САУ второго порядка. В этом случае

$$A(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad a_2 > 0;$$

$$R = \begin{bmatrix} a_0 & 0 \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix}; \quad R_1 = [a_1]; \quad R_2 = R.$$

Определяем условия устойчивости по Гурвицу:

$$|R_1| = a_1 > 0; \quad |R_2| = a_0 \times a_1 > 0.$$

Если  $a_1 > 0$ , то из последнего неравенства следует, что  $a_0 > 0$ . Если  $a_1 < 0$ , то из последнего неравенства следует, что  $a_0 < 0$ .

Таким образом, для САУ второго порядка необходимые условия устойчивости являются и достаточными.

Критерий устойчивости САУ третьего порядка. В этом случае

$$A(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0; \quad a_3 > 0;$$

$$R = \begin{bmatrix} a_0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_2 \end{bmatrix}; \quad R_1 = [a_2]; \quad R_2 = \begin{bmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{bmatrix}; \quad R_3 = R.$$

Вычисляем определители диагональных подматриц матрицы Гурвица

$$|R_1| = a_2; \quad |R_2| = a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3; \quad |R_3| = a_0 \times |R_2|.$$

Определяем условия устойчивости по Гурвицу:

$$1) a_3 > 0; \quad 2) |R_1| = a_2 > 0; \quad 3) |R_2| = a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3 > 0; \\ |R_3| = a_0 |R_2| > 0; \text{ при } |R_2| > 0 \text{ следует } a_0 > 0.$$

Из предпоследнего неравенства следует также, что  $a_1 > a_0 \times a_3 / a_2 > 0$ . Полученный результат называется правилом Вышнеградского:

Для того, чтобы САУ третьего порядка была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты ее характеристического полинома были положительны и произведение средних членов было больше произведения крайних.

$$a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3 > 0.$$

В практических расчетах с применением с ЭВМ чаще используют модификацию критерия Гурвица: критерий Рауса.

#### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.**

1. Чем вызвано применение различных динамических характеристик?
2. В чем причина широкого использования передаточных функций?
3. Какие Вы знаете виды соединения звеньев?
4. Какова связь между передаточными функциями замкнутой и разомкнутой САУ?
5. Какая система называется устойчивой?
6. Какие Вы знаете алгебраические критерии устойчивости?
7. С помощью каких критериев оценивается качество работы САУ?

#### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## ЛЕКЦИЯ 4.

### СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

#### 4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНТЕЗЕ САУ

**Синтез САУ** — это определение структуры, состава элементов, и значений параметров САУ, при которых она удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям. Данное определение характеризует общую задачу синтеза.

**Законом управления (ЗУ)** САУ называется зависимость сигнала управления  $u(t)$ , подаваемого на ее исполнительное устройство, от входных и выходных сигналов.

**Корректирующим устройством (КУ)** называется вспомогательный элемент САУ, заданный передаточной функцией и применяемый для улучшения качества ее процессов управления. Можно сказать, что КУ — это форма реализации ЗУ.

В общем случае искомый закон управления имеет вид:

$$u(t) = f[\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t), \ddot{\varepsilon}(t), \dots, \int \varepsilon(\tau) d\tau],$$

где  $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$  — сигнал рассогласования. Он выбирается в зависимости от требований к качеству управления и устойчивости замкнутой САУ.

Различают следующие виды управлений:

**П** - управление (пропорциональное):  $u(t) = k_1 \varepsilon(t)$ .

С увеличением коэффициента усиления  $k_1$  время регулирования и ошибки САУ в установившемся режиме уменьшаются. Но при этом, как правило, уменьшается запас устойчивости.

2) **ПИ** - управление (пропорционально - интегрирующее):

$$u(t) = k_1 \varepsilon(t) + k_0 \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau.$$

Как известно, порядок астатизма САУ по отношению к задающему воздействию равен числу интегрирующих звеньев в передаточной функции разомкнутой системы. Если интегрирующих звеньев нет, то их вводят в закон управления. Но введение интеграла в закон управления уменьшает запас устойчивости замкнутой САУ. Таким образом, как и при

**П** – управлении, требования к точности САУ в установившемся режиме и в этом случае вступают в противоречие с устойчивостью.

3) **ПД** - управление (пропорционально - дифференциальное):

$$u(t) = k_1 \varepsilon(t) + k_2 \dot{\varepsilon}(t).$$

Для разрешения противоречия между устойчивостью и точностью в закон управления вводят производную от регулируемой величины.

4) **ПИД** - управление (пропорционально – дифференциальное - интегрирующее):

$$u(t) = k_1 \varepsilon(t) + k_2 \dot{\varepsilon}(t) + k_0 \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau.$$

В приведенных выше законах управления коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_0$  называются передаточными числами САУ по ошибке, по производной от ошибки, по интегралу от ошибки соответственно. Структурные схемы КУ, реализующих типовые законы управления представлены на рис. 1.

Синтезируемая САУ должна удовлетворять требованиям, выраженным через основные показатели качества:

- время регулирования:  $t_p < t_{p \text{ зад}}$ ;

- перерегулирование:  $\sigma < \sigma_{\text{зад}}$ ;

ошибки в установившемся режиме:  $E_y < E_{y \text{ зад}}$ , Т.Д.,

где  $t_{p \text{ зад}}$ ,  $\sigma_{\text{зад}}$ ,  $E_{y \text{ зад}}$  - заданные при проектировании требования к показателям качества САУ.

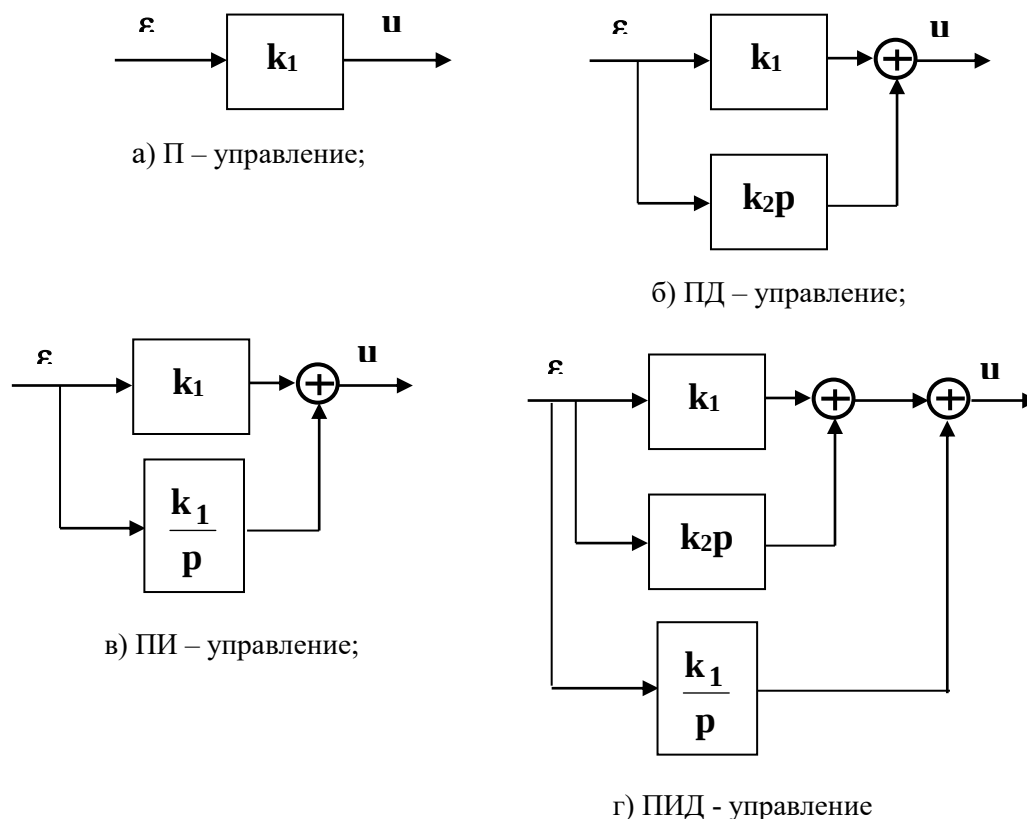


Рис.4.1. Структурные схемы корректирующих устройств, реализующих типовые законы управления:

## 4.2 ТИПОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для регулирования объектами управления, как правило, используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев (описание типовых звеньев представлено в разделе 3.4):

П-регулятор, пропорциональный регулятор. Передаточная функция П-регулятора:  $W_p(s) = K_1$ . Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка  $E$ , тем больше управляющее воздействие  $Y$ ).

И-регулятор, интегрирующий регулятор. Передаточная функция И-регулятора:  $W_i(s) = K_0/s$ . Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

Д-регулятор, дифференцирующий регулятор. Передаточная функция Д-регулятора:  $W_d(s) = K_2*s$ . Д-регулятор генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины:  $Y = K_2 * dE/dt$ . На практике данные простейшие П, И, Д регуляторы комбинируются в регуляторы вида ПИ, ПД, ПИД (см. рис.1):

В зависимости от выбранного вида регулятор может иметь пропорциональную характеристику (П), пропорционально-интегральную характеристику (ПИ), пропорционально-дифференциальную характеристику (ПД) или пропорционально-интегральную (изодромную) характеристику с воздействием по производной (ПИД-регулятор).

ПИ-регулятор, пропорционально-интегральный регулятор (см. рис.4.1.в) ПИ-регулятор представляет собой сочетание П- и И-регуляторов. Передаточная функция ПИ-регулятора:  $W_{пи}(s) = K_1 + K_0/s$ .

ПД-регулятор, пропорционально-дифференциальный регулятор (см. рис.4.1.б) ПД-регулятор представляет собой сочетание П- и Д-регуляторов. Передаточная функция ПД-регулятора:  $W_{пд}(s) = K_1 + K_2 s$ .

ПИД-регулятор, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (см. рис.4.1.г)

ПИД-регулятор представляет собой сочетание П-, И- и Д-регуляторов. Передаточная функция ПИД-регулятора:  $W_{пид}(s) = K_1 + K_0 / s + K_2 s$ .

Наиболее часто используется ПИД-регулятор, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов.

П – РЕГУЛЯТОР применяется для управления объектами с самовыравниваем и без самовыравнивания при небольших изменениях нагрузок, если технологическим режимом допустимо остаточная ошибка.

И – РЕГУЛЯТОР применяется для управления объектами с самовыравниваем. Поскольку быстродействие И-регулятора невелико, самовыравнивание должно быть значительным, запаздывание небольшим, а изменение нагрузок плавным.

ПИ – РЕГУЛЯТОР применяется для регулирования как устойчивых, так и нейтральных объектов при больших, но плавных изменениях нагрузок, когда требуется высокая точность регулирования в статическом режиме.

ПД и ПИД – РЕГУЛЯТОРЫ обеспечивают относительно высокое качество регулирования объектов, обладающих большим переходным запаздыванием, а также в тех случаях, когда нагрузка в объектах регулирования изменяется часто и быстро.

Двухпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы представляют обычный и наиболее широко распространенный метод регулирования. Двухпозиционные регуляторы используются для управления переключательными элементами - дискретными исполнительными устройствами:

электромеханическими реле,  
контакторами,  
транзисторными ключами,  
симисторными или тиристорными устройствами,  
твердотельными реле и др.

В простейшем случае (без обратной связи) двухпозиционный регулятор работает как двухпозиционный переключатель. Например, мощность, подаваемая на нагреватель, имеет только два значения - максимальное и минимальное (нулевое), две позиции (отсюда и название регулятора - двухпозиционный) - нагреватель полностью включен или полностью выключен. Структурная схема двухпозиционной системы регулирования нарисовать самостоятельно.

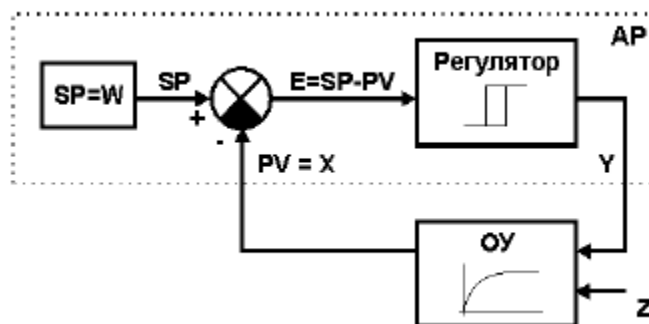


Рис.4. 2. Структурная схема двухпозиционной системы регулирования

где: **AP** – двухпозиционный регулятор,

**ОУ** – объект управления,

**SP** – узел формирования заданной точки (задания),

**E** – рассогласование регулятора,  
**PV=X** – регулируемая величина,  
**Y** – управляющее воздействие,  
**Z** – возмущающее воздействие.

Для предотвращения «дребезга» управляющего выходного устройства, предусматривается гистерезис  $H$ .

Двухпозиционные регуляторы часто используют для вспомогательных нужд, а не для непосредственного регулирования. Например:

если объектом управляет ПИД регулятор (с аналоговым или импульсным выходом), двухпозиционный регулятор может включать дополнительный контур нагрева или охлаждения для ускорения выхода процесса на режим,

двухпозиционный регулятор может запрещать вентиляцию при очень низкой температуре на улице или отсутствии центрального отопления.

Недостатки двухпозиционных регуляторов

Двухпозиционные регуляторы практически неприменимы для систем с существенным транспортным запаздыванием ( $T_d > 0,2T$ ) и для объектов без самовыравнивания, так как регулируемая величина далеко выходит за необходимые пределы регулирования. В этом случае применяют регуляторы с ПИ или ПИД законом регулирования

Самовыравниванием называют свойство объекта самостоятельно (без участия регулятора) восстанавливать нарушенное равновесие притока вещества или энергии со стороны, в результате чего после некоторого времени (времени переходного процесса) определенный параметр вновь принимает установившееся значение (не обязательно прежнее)

#### 4.3 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

ИУ - это силовые устройства, воздействующие на технологический процесс в соответствии с полученным командным сигналом. Они состоят из двух функциональных блоков: исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО), и могут оснащаться дополнительными блоками.



#### 4.4 ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИУ

Наибольшее распространение имеют мембранные ПИМ. В них мембрана воспринимает давление сжатого воздуха и преобразует его в перемещение выходного устройства. Они надежны, просты по конструктивному исполнению, ремонтпригодны, дешевы, развивают усилие до 40 кН и обеспечивают перемещение выходного устройства на расстояния от 4 до 100 мм. В зависимости от направления движения выходного органа (штока) МИМ подразделяются на механизмы прямого и обратного действия. В механизме прямого действия при увеличении давления шток выталкивается из ПИМ, а в механизме обратного действия втягивается в ПИМ.

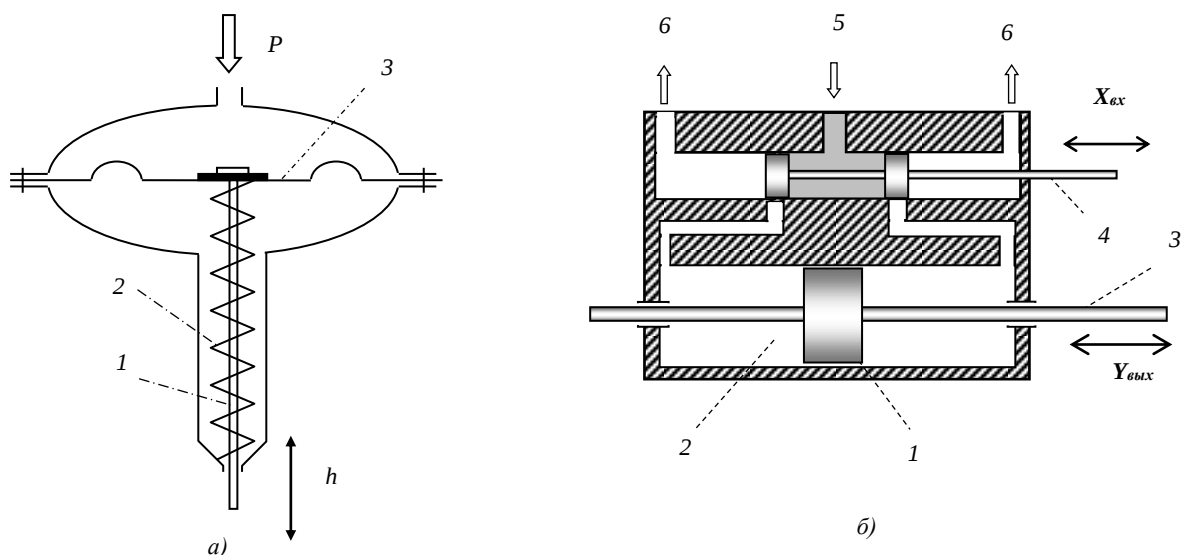


Рис.4.3. Исполнительные устройства: а) пневматическое (1 – шток; 2 – пружина; 3 – мембрана); б) гидравлическое (1- поршень; 2 – рабочий цилиндр; 3 – выходной шток; 4 – золотник; 5 – высокое давление; 6 – низкое давление)

механизмы прямого действия применяют для РО нормально открытого типа, механизмы обратного действия — для управления РО нормально закрытого типа. Поршневые ПИМ используют в тех случаях, когда на перемещение РО затрачиваются значительные перестановочные усилия

#### 4.5 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИУ

Гидравлические исполнительные устройства преобразуют энергию потока рабочей жидкости в энергию механического движения поршня (поступательное движение) или ротора (вращательное движение). Применяются при больших перемещениях РО и больших усилиях.

Гидравлические ИУ (ГИУ) широко применяются в системах автоматического управления. Конструкции ГИУ довольно разнообразны. Чаще всего применяются ГИУ поршневого типа с золотниковым распределителем (рис. 16.5, б). Рабочая жидкость (обычно масло) подается насосом в центральный канал 5 высокого давления. Если золотник 4 находится в среднем положении, то его буртики прикрывают другие каналы и доступ масла рабочий цилиндр 2 закрыт. Поршень 1 и выходной шток 2 ГИУ при среднем положении золотника неподвижны. При перемещении золотника вправо открывается доступ масла в правую полость рабочего цилиндра. Одновременно левая полость сообщается с каналом 6 низкого давления. Давление в правой полости рабочего цилиндра становится больше давления в левой полости, и поршень движется влево. При движении золотника влево поршень со штоком движется вправо.

Входной величиной ГИУ является перемещение золотника  $X_{вх}$ ,

а выходной — перемещение штока рабочего цилиндра  $Y_{вых}$ . Входная и выходная величины имеют одинаковую размерность, т.е. в этом отношении ГИУ аналогичны усилителям и часто именуются гидроусилителями. Как звено управления рассмотренный ГИУ является интегрирующим звеном.

Во многих САУ ГИУ снабжается жесткой обратной связью ЖОС, как правило, механической. Этим обеспечивается слежение выходного штока за штоком золотника. Передаточная функция ГИУ с ЖОС равна передаточной функции апериодического звена.

Механическое перемещение золотника во многих САУ осуществляется электрическим ИУ, а соответствующее комбинированное ИУ называется электрогидравлическим.

Достоинства ГИУ: высокая надежность, большой ресурс работы, малая инерционность, простота преобразования энергии потока жидкости в механическую мощность на выходе ГИУ, сравнительно малое перестановочное усилие для перемещения золотника, возможность значительного изменения инерционных нагрузок без ухудшения динамических свойств, возможность плавного изменения выходных параметров в широком диапазоне, устойчивость к вибрациям.

Недостатки ГИУ: значительный вес трубопроводов, трудность ликвидации их повреждений, возможность утечки масла, влияние температуры на вязкость масла, а стало быть, и на характеристики ГИУ

#### 4.6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИУ

Различают следующие виды ЭИУ: электромагнитные (ЭМИУ) и электродвигательные (ЭДИУ).

В электромагнитных ИУ усилие, необходимое для перестановки затвора РО, создается электромагнитом (рис.16.6).

Когда по катушке электромагнита 1 протекает ток, сердечник 2, соединенный с затвором РО, втягивается в электромагнит (индукционную катушку), открывая проход для рабочей среды. Если ток в катушке электромагнита отсутствует, пружина 3 выталкивает сердечник из электромагнита, и затвор РО перекрывает проход для рабочей среды. Статическая характеристика ЭМИУ (рис.16.6) нелинейная, и их применяют в основном в системах позиционного регулирования и в системах защиты и блокировки, так как затвор РО может занимать только два крайних положения (открыто – закрыто).

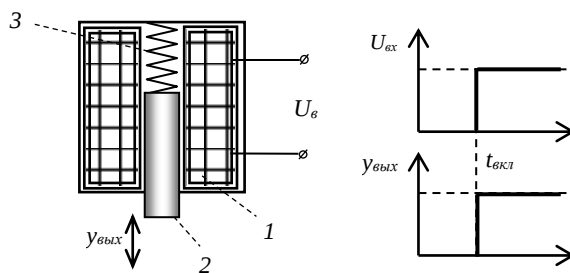


Рис. 4.4. Электромагнитное исполнительное устройство:  
1 – электромагнит, 2 – якорь, 3 – пружина

При установке ЭМИУ на трубопроводах для жидкостей следует иметь в виду, что их практически мгновенное действие приводит к гидравлическим ударам.

К ЭМИУ относятся также фрикционные, порошковые и асинхронные электромагнитные муфты (ФЭММ, ПЭММ, АЭММ).

ФЭММ состоит из двух полумуфт, посаженных на ведущий ведомый валы. В одной из них полумуфта расположена обмотка возбуждения. При подаче на нее напряжения полумуфты сдвигаются и возникающая сила трения приводит их в движение. Такие муфты также применяют в системах позиционного регулирования и защиты оборудования при аварийных нарушениях его работы.

ПЭММ отличается от ФЭММ тем, что полумуфты заполнены ферромагнитной массой. Принцип действия ПЭММ основан на изменении вязкости ферромагнитной массы при изменении напряженности магнитного поля. При подаче на катушку напряжения вязкость ферромагнитной массы возрастает и передаваемый момент увеличивается.

В АЭММ момент вращения передается посредством магнитного поля, создаваемого обмоткой, расположенной на ведущей полумуфте. При ее вращении в ведомой полумуфте, как в роторе асинхронного двигателя, индуцируется ток, от взаимодействия которого с магнитным полем возникает момент вращения, увлекающий ведомую полумуфту за ведущей.

ПЭММ и АЭММ могут быть использованы и в системах непрерывного регулирования. В этом случае их динамические свойства характеризуются передаточной функцией апериодического звена с постоянной времени 0,03 ... 0,25 с (для ПЭММ) и 0,11 ... 0,45 с (для АЭММ).

#### 4.7 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНЫЕ ИУ

Устройства данного типа представляют собой электродвигатели постоянного и переменного тока (асинхронные трехфазные, асинхронные двухфазные с полым ротором и конденсатором в цепи обмотки управления).

ЭДИУ с двигателями постоянного тока имеют независимое возбуждение или возбуждение от постоянных магнитов. Управляют этими двигателями, изменяя напряжение на якоре (якорное управление, рис.16.7, а) или на обмотке возбуждения (полюсное управление, рис. 16.7, б).

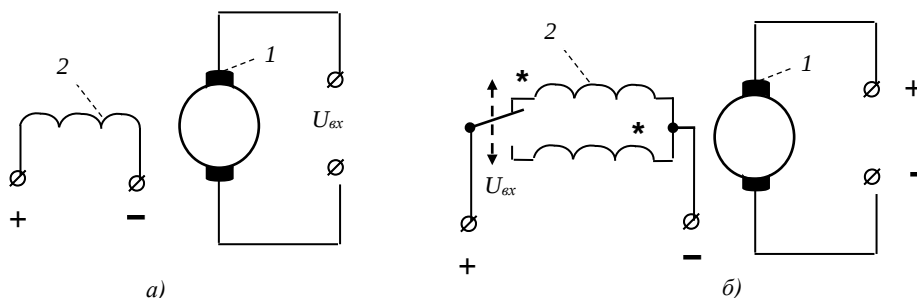


Рис.4.5. Электродвигательные исполнительные устройства постоянного тока:

а) с якорным управлением; б) с полюсным управлением

При рассмотрении двигателей с якорным управлением в качестве входной величины рассматривается напряжение на щетках коллектора  $U_{вх}$ , в качестве выходной величины – скорость вращения двигателя  $\omega$ . Передаточная функция двигателя в этом случае равна передаточной функции апериодического звена.

У двигателей с полюсным управлением имеются две обмотки возбуждения, намотанные встречно. При переключении обмоток магнитный поток возбуждения изменяет свое направление. Поэтому, знак крутящего момента, а, следовательно, и направление вращения двигателя определяется положением управляющего реле. Недостатком такого управления состоит в том, что они могут применяться только в сочетании с релейными усилителями. Плавные характеристики управления двигателем с полюсным управлением можно получить, применяя вибрационную линеаризацию.

Двухфазные исполнительные двигатели (ДИД) широко применяются в быстродействующих автоматических устройствах, следящих системах и системах дистанционного управления для преобразования управляющего электрического сигнала в линейное или вращательное перемещение рабочего органа. Работа таких двигателей характеризуется частыми пусками и реверсом направления движения. С целью сокращения времени переходных процессов их делают малоинерционными. Двигатели должны быстро тормозиться после снятия управляющего сигнала.

Конструктивно ДИД представляют собой двухфазную асинхронную машину с короткозамкнутым ротором. Наибольшее распространение получили ДИД с полым ротором (рис.16.8). Для создания управляемого вращающегося магнитного поля в ДИД необходимо выполнение следующих условий: оси фазных обмотки должны располагаться на статоре под углом 90° по отношению друг к другу; напряжения фазных обмоток должны быть смещены по фазе на угол 90° (это достигается включением конденсатора в цепь обмотки управления); управление направлением

вращения ротора двигателя осуществляется изменением фазы управляющего напряжения.

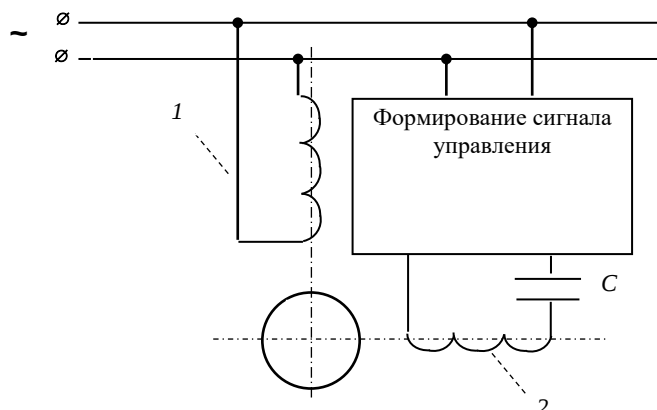


Рис.4.6. Двухфазный исполнительный двигатель с полым ротором: 1 - обмотка возбуждения; 2 - обмотка управления

Обмотка возбуждения подключается к сети переменного тока, управляющая обмотка подключается к усилителю управляющего сигнала или непосредственно к датчику. Усилитель или датчик должны питаться от того же источника, что и обмотка возбуждения. Сдвиг по фазе между напряжениями обмоток достигается включением конденсатора в цепь обмотки управления или обмотки возбуждения.

Достоинства ДИД: отсутствие скользящих контактов, простота и надежность конструкции

#### 4.8 РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ (РО)

Устройство, позволяющее изменять расход или направление потока вещества или энергии в технологическом процессе, называются регулирующим органом (РО).

Это устройство, непосредственно воздействующее на выходные величины ОУ, используется для их изменения по заданным законам. Различают РО объемного, дроссельного и скоростного типа.

РО объемного типа изменяют расход вещества за счет изменения ее объема.

В РО дроссельного типа управление расходом вещества осуществляется с помощью дроссельных устройств.

РО скоростного типа изменяют свою производительность изменением скорости вращения.

РО дроссельного типа

Дроссельным называется устройство, предназначенное для изменения расхода протекающих через него жидкостей или газов.

К дроссельным РО относятся клапаны (односедельные, двухседельные, шаровые, трехходовые, шланговые, и др.), поворотные заслонки, шиберы, краны и т.д.

В односедельном РО (см. рис.4.7, а) проходное сечение образовано одним цилиндрическим или профилированным затвором 2, который перемещается вдоль оси неподвижного седла 3. При перемещении затвора изменяется проходное сечение и соответственно расход среды, проходящей через РО. Односедельные РО применяют при низких давлениях среды, когда усилия на штоке малы и можно использовать исполнительные устройства (ИУ) небольших размеров и малой мощности.

В двухседельном РО (см. рис.4.7, б) проходное сечение образовано двумя цилиндрическими или профилированными затворами 2, которые перемещаются вдоль оси двух неподвижных седел 3. Пропускная способность двухседельного РО примерно в 1.6 раза выше пропускной способности односедельного РО при одинаковом диаметре условного прохода. Затвор двухседельного РО разгружен, так как усилия, создаваемые регулируемой средой, действуют на плунжеры затвора в противоположных направлениях. Разгрузка затвора улучшает качество регулирования и снижает необходимое перестановочное усилие ИУ, а следовательно, его габариты и массу.

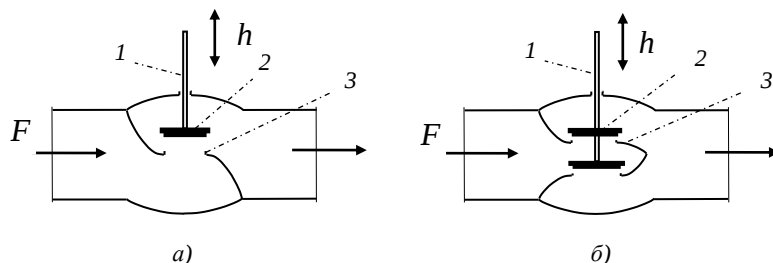


Рис.4.7. Схемы регулирующих клапанов: а) односедельного, б) двухседельного (1 – шток, 2 – затвор, 3 – седло)

Шаровой РО (рис.4.8, а) снабжен поворотным затвором 2 в виде сферы с цилиндрическим отверстием и седлами 3, уплотнительные поверхности которых имеют форму сферы. Шток 1, связанный с исполнительным устройством, осуществляет поворот шарового затвора, изменяя тем самым площадь проходного сечения. В закрытом положении затвор упирается в пару седел, изготовленных из упругих материалов (например, фторопласта), обеспечивая герметичность перекрытия прохода. Простая форма проточной части шарового РО позволяет применять его для регулирования потоков вязких и кристаллизующихся сред, шламов, пульп, а также сред, содержащих абразивные частицы. Шаровые РО могут работать при перепадах давлений до 8 МПа в интервалах температур от -60 оС до +230 оС.

Затвор заслоночного РО (рис.4.8, б) представляет собой заслонку 4 (например, металлический диск), при повороте которой

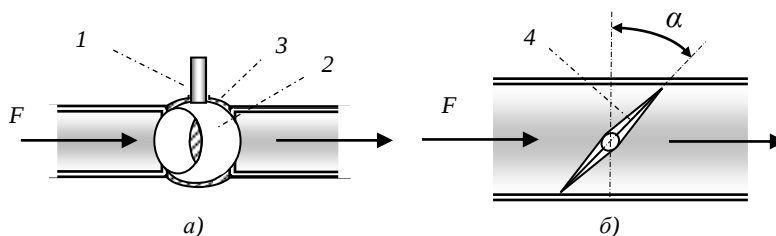


Рис.4.8. Схемы регулирующих клапанов: а) шарового, б) заслоночного (1 – шток, 2 – шаровой затвор, 3 – седло, 4 - заслонка)

изменяется проходное сечение и пропускная способность РО. Когда заслонка полностью открыта (расположена параллельно оси трубопровода) пропускная способность РО максимальна. При закрытой заслонке пропускная способность РО минимальна (так как затвор не обеспечивает полного перекрытия трубопровода). Для поворота заслонки нужно ИУ относительно небольшой мощности. Заслоночные РО

применяются для изменения больших расходов газа и пара при невысоких перепадах давления (до 2.5 МПа) и температурах до 400 оС.

В шиберх затвор, изготовленный в виде полотна, перемещается перпендикулярно направлению потока (рис. 4.9). Шиберы применяются для регулирования расходов воздуха и газов при небольших статических давлениях (до 0.01 МПа), а также для дозирования сыпучих материалов. Шиберы устанавливаются на трубопроводах, коробах и каналах любой геометрической формы сечения.

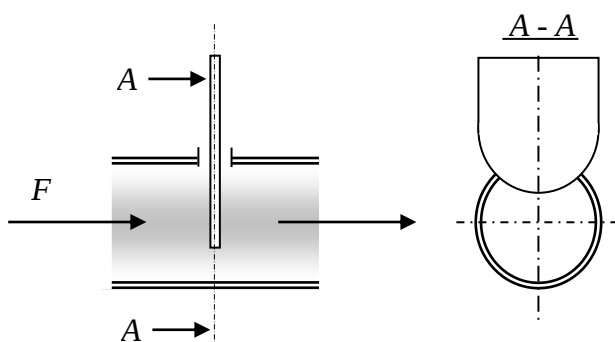


Рис.4.9. Схема шибера

РО скоростного типа

РО скоростного типа изменяют свою производительность изменением скорости вращения.

К РО этого типа относятся устройства для регулирования частоты вращения вытяжных вентиляторов, вибрационных, ленточных, шнековых и др. питателей.

В связи большим разнообразием физико-химических свойств дозируемых сыпучих материалов и условий, в которых работают РО, известно большое число конструкций их рабочих органов. Эти органы состоят, как правило, из активных элементов, обеспечивающих перемещение дозируемого материала, ограничивающих элементов, формирующих поток, и вспомогательных элементов.

Рациональный выбор рабочего органа и его конструктивное оформление в значительной степени обеспечивают надежность устройства и точность дозирования.

Вибрационные питатели

Вибрационные питатели (рис.4.10, а) предназначены для подачи из бункера, не имеющего дна, мелко- и крупнокусковых

Подачу материала регулируют изменением амплитуды выпрямленного напряжения, подводимого к электромагниту питателя. Электромагнит, жестко связанный с корпусом лотка лотка, заставляет его вибрировать с определенной частотой. Материал вследствие небольшого наклона лотка перемещается к его концу со скоростью, зависящей от амплитуды питающего напряжения.

Достоинства вибрационных питателей – отсутствие вращающихся частей, плавное и практически безынерционное регулирование производительности.

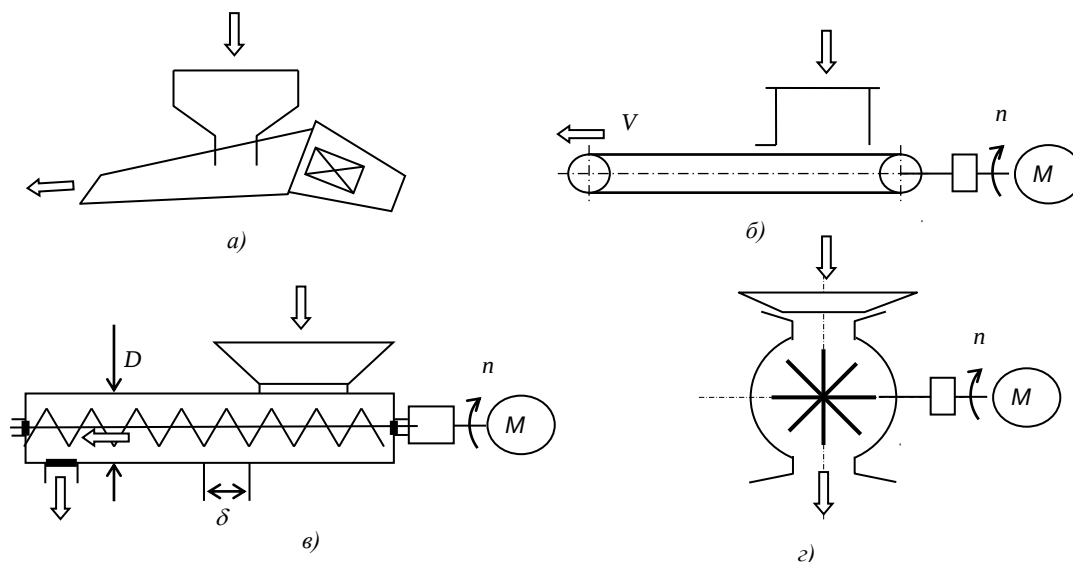


Рис.4.10. Регулирующие органы скоростного типа: а) вибрационный; б) ленточный; в) шнековый; г) секторный

#### Ленточные питатели

Ленточные питатели (рис. 4.10. б) предназначены для перемещения сыпучих материалов с различными размерами и формой фракций. Производительность питателя зависит от размеров фракций материала и скорости перемещения ленты  $V$ . Последнюю можно регулировать, изменяя частоту вращения электропривода или бесступенчатого вариатора, управляемого исполнительным устройством.

#### Шнековые питатели

Шнековые питатели (рис. 4.10, в) применяются для подачи мелкозернистых и мелкодисперсионных материалов. Производительность шнекового питателя пропорциональна квадрату диаметра рабочего винта  $D$ , шагу  $\delta$  и частоте его вращения  $n$ .

#### Секторные питатели

Секторные питатели (рис. 4.10, г) предназначены для подачи мелкозернистых материалов. Основа его конструкции - вращающийся барабан, разделенный радиальными перегородками на несколько секторов. Секторный питатель устанавливают под бункером. Материал перемещается за счет поочередного заполнения и опорожнения секторов в процессе вращения ротора. Производительность регулируют, изменяя частоту  $n$  вращения рабочего органа.

Недостатком питателя является зависимость степени заполнения секторов от числа оборотов  $n$  вращения ротора.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.

1. Корректирующие устройства.
2. Типовые регуляторы.
3. Позиционные регуляторы.
4. Исполнительные устройства (исполнительные механизмы и регулирующие органы).
5. Регулирующие органы.

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и

синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.

3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.

2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## **ЛЕКЦИЯ 5.**

### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.**

Единственным способом получения объективных данных о свойствах предметов и процессов материального мира являются измерения, в результате которых и могут быть определены данные о физических величинах (или параметрах), характеризующих объект, подвергшийся измерению.

#### **5.1 ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ**

К основополагающим терминам в области метрологии можно отнести следующие:

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение — это нахождение значения физической величины с помощью специальных технических средств;

Единство измерений — это состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Точность измерений — это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

К основным проблемам метрологии относятся: общая теория измерений; единицы физических величин и их системы; методы и средства измерений; методы определения точности измерений; основы обеспечения единства измерений и единообразие средств измерений; эталоны и образцовые средства измерений; методы передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам измерений.

В практике измерений имеют применение следующие метрологические термины:

Измерительная информация — это сигнал измерительной информации о значениях измеряемых физических величин, функционально связанных с измеряемой физической величиной.

Средство измерений — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы могут быть аналоговыми, цифровыми, показывающими, регистрирующими, самопишущими, печатающими, интегрирующими, суммирующими, сигнализирующими и т. п.

Измерительный преобразователь (датчик) — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки, хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Эти измерительные устройства — преобразователи, подразделяются на первичные, промежуточные, передающие, масштабные и некоторые другие виды.

Эталон единицы физической величины — средство измерений или комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины в целях передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона. Поверка средств измерений — определение метрологическим органом погрешностей средств измерений и установление их пригодности к применению.

## 5.2 ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА. ЕДИНИЦЫ И РАЗМЕРНОСТИ

Физических величин

Физическая величина (или просто величина) — это свойство, общее в качественном отношении многим объектам (системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению придано значение, равное единице.

Каждая физическая величина, таким образом, характеризуется индивидуальным значением, являющимся произведением числового значения величины на ее единицу. Совокупность физических величин, связанных между собой определенными зависимостями, основанными на законах физики, называется системой физических величин. В настоящее время применяется Международная система единиц (СИ). Система физических величин состоит из основных, производных и дополнительных величин.

-метр, килограмм, секунда, ампер, термодинамическая

температура Кельвина, количество вещества ,

две дополнительные (угловые)

— радиан и стерадиан и ряд производных

Физическая величина, входящая в систему и условно принятая не зависимой от других величин этой системы, называется основной физической величиной. В системе СИ имеют место семь основных величин — длина (L), масса (M), время (T), термодинамическая температура Кельвина (K), сила тока (I), сила света (Кд), количество вещества (N).

Физическая величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы, называется производной физической величиной. Например, сила  $F = ma$ , где  $m$  — масса;  $a$  — ускорение, вызываемое силой  $F$ . Величины «плоский угол» и «телесный угол» являются дополнительными. Физическая величина, которой присвоено числовое значение, равное единице, называется единицей физической величины.

Меры единиц физических величин в процессе их использования могут быть утрачены. Во избежание этого организуется хранение мер как в государственном, так и в международном масштабе. Изготавливаются эталоны — средства измерений, обеспечивающие воспроизведение и хранение единиц с самой высокой точностью, достижимой при данном состоянии науки и техники. Размеры эталонов передаются другим средствам измерений по специальной поверочной схеме.

## 5.3 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

Основное уравнение измерения имеет вид

$$Q = A \times n$$

где  $Q$  — значение физической величины;

$n$  — размер физической величины;

$A$  — единица физической величины.

По способу получения результата измерения подразделяются на прямые, косвенные, совокупные и совместные.



Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных.

Косвенное измерение - измерение, при котором искомое значение величины находят на основании зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми, прямым измерениям.

Принцип измерений – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Средство измерений – техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

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

Цифровой измерительный прибор – измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Показывающий измерительный прибор – измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний.

Показания средства измерений – измерение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины.

Градуировочная характеристика средства измерений – зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы.

Диапазон показаний – область значений шкалы, ограниченная конечными и начальными значениями шкалы.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений.

Предел измерений – наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений.

Чувствительность измерительного прибора – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Результат любого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины на некоторое значение, зависящее от точности методов и средств измерения, квалификации оператора, производящего измерения, условий, при которых они осуществляются. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется *погрешностью измерения*:

- 1) случайные погрешности;
- 2) промахи;
- 3) систематические.

Виды погрешностей:

- 1) абсолютные:  $\Delta X = X - X_0$ ,

где  $X$  - измеренное значение параметра,  $X_0$  - истинное значение;

Абсолютная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

- 2) относительные:  $\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} 100\%$  (выраженные в %-ах);

Относительная погрешность измерения – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины. Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

- 3) приведенные:  $\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\max} - X_{\min}} 100\%$ ,

где  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  - минимальное и максимальное значения измеряемой величины.

Максимальная приведенная погрешность называется классом точности:

$$\gamma = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\max} - X_{\min}} 100\%.$$

В зависимости от класса точности приборы делятся на эталонные (образцовые) и рабочие.

1. Метод непосредственной оценки заключается в определении значения измеряемой величины непосредственно по отчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Таким образом, этот метод характеризуется прямым преобразованием значения измеряемой величины в выходную величину, показываемую или записываемую прибором.

2. Метод сравнения с мерой, или метод сравнения, заключается в сравнении измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой.

3. Дифференциальный метод заключается в сравнении с мерой, при котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой.

4. Нулевой (компенсационный) метод заключается в сравнении с мерой, при котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводится до нуля.

На практике часто используют понятие — «*точность измерений*», которая определяет близость результата измерений к истинному значению измеряемой величины.

В зависимости от характера проявления погрешности измерений подразделяются на систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематические погрешности — это погрешности, которые остаются постоянными или закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины. Такие погрешности могут возникать, например, при постепенном уменьшении силы рабочего тока в цепи электроизмерительного потенциометра. К систематическим относятся также погрешности метода измерения, инструментальная погрешность, погрешность отсчитывания, погрешность интерполяции и т.д. Систематические погрешности неизбежны, однако влияние их можно исключить, за счет введения дополнительных поправок.

Случайными называют погрешности, не подчиняющиеся какой-либо известной зависимости. Они возникают в результате влияния на процесс измерения случайных факторов (вибрации, электромагнитных полей и т.д.). Случайные погрешности всегда присутствуют в эксперименте; они в равной степени могут быть как положительными, так и отрицательными. Для учета влияния случайных погрешностей на результат измерения одну и ту же величину измеряют многократно.

Грубые погрешности возникают при нарушении правил пользования приборами, невнимательности экспериментатора и т.д., т.е. это те погрешности, которые имеют эпизодический характер и по своему абсолютному значению приближаются к измеряемой величине.

Методические погрешности формируются: от несовершенства метода измерения; использования упрощенных допущений и предположений при выводе формул; влияния измерительного устройства на объект измерения. Например, процесс измерения температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность, вызванную нарушением температурного режима исследуемого объекта, вследствие внесения в него термопары и искажения температурного (теплового) поля.

Инструментальные погрешности зависят от погрешностей применяемых средств измерения. Причинами инструментальных погрешностей могут быть неточность градуировки измерительных устройств, их конструктивное несовершенство, изменение эксплуатационных характеристик во времени и т. д., и т. п. Источниками этого вида погрешностей также могут быть влияния внешних магнитных и электрических полей, воздействие вибраций, а также отклонение от нормальных условий эксплуатации данного средства измерения.

Субъективные погрешности обусловлены низкой квалификацией экспериментатора, которые формируются из-за неправильного отсчета показаний прибора человеком-оператором, его невнимательности, рассеянности и неуравновешенности и т. п., т. е. человеческим фактором.

Систематические погрешности могут оставаться постоянными либо закономерно изменяться. Их определение осуществляется путем многократного повторения процесса измерения физической величины.

#### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.**

1. Погрешности измерений и измерительных приборов.
2. Государственная система приборов (ГСП).
3. Средства измерений и их основные элементы.
4. Структура измерительных систем для прямых измерений.

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## ЛЕКЦИЯ 6.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 6.1 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температурой называется степень нагретости вещества. Это свойство проявляется в тепловом контакте. Тело, отдающее тепло, считается более нагретым или имеющим более высокую температуру.

Для ее измерения выбираются те физические свойства объекта, которые однозначно меняются с изменением температуры, не подвержены влиянию других факторов и сравнительно легко поддаются измерению. Это: *объемное расширение, изменение давления в замкнутом объеме, изменение электрического сопротивления, возникновение термоэлектродвижущей силы и интенсивность излучения.*

При измерении температуры используются две шкалы: Цельсия и Кельвина. В шкале Цельсия (Международной практической температурной шкале) в качестве нуля принята температура замерзания воды. В шкале Кельвина (абсолютной, термодинамической, Международной системе СИ) в качестве нуля принята температура абсолютного нуля, при которой скорость молекул равна нулю. Единица измерения в 2-х шкалах одна и та же:

$$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}..$$

Количественно температуры по Кельвину и по Цельсию связаны между собой так:

$$T [\text{K}] = t [^{\circ}\text{C}] + 273.15.$$

Приборы для измерения температуры разделяются в зависимости от используемых ими физических свойств веществ на следующие группы с диапазоном показаний:

|                                     |                  |
|-------------------------------------|------------------|
| Термометры расширения .....         | -190 - + 650 °C  |
| Манометрические термометры.....     | -160 - + 600 °C  |
| Термометры сопротивления .....      | -200 - + 650 °C  |
| Термоэлектрические термометры ..... | -50 - + 1800 °C  |
| Пирометры .....                     | +300 - + 6000 °C |

#### 6.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В зависимости от принципа действия приборы согласно ГОСТ 13417-76 подразделяются на:

Монометрические термометры - они основаны на измерении давления рабочего вещества при постоянном объеме с изменением температуры.

Термоэлектрические термометры - основа - термоэлектрический преобразователь (термопара), действие которого основано на зависимости термоЭДС от температуры.

Термометры сопротивления - содержат термопреобразователь, действие которого основано на зависимости электрического сопротивления от температуры. Их делят на проводниковые и полупроводниковые.

Пирометры излучения - квазимонохроматические, пирометры спектрального отношения, пирометры полного излучения. Действие основано на законах Планка и Вина

#### 6.3 ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

Принцип действия термометров расширения основан на свойстве тел под действием температуры изменять объем, а следовательно, и линейные размеры. Термометры расширения разделяются на жидкостные стеклянные (рис. 6.1.) и механические (дилатометрические и биметаллические) (рис. 6.1.).



Рис. 6.1. Жидкостный термометр

К дилатометрическим термометрам относятся *стержневой* и *пластинчатый* (биметаллический) термометры, действие которых основано на относительном удлинении под

влиянием температуры двух твердых тел, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

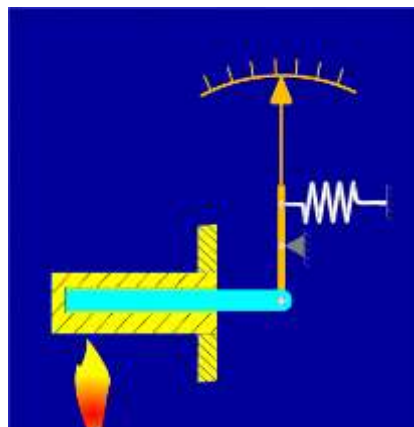
Зависимость длины  $l$  твердого тела от его температуры  $t$  выражается равенством

$$l = l_0 (1 + \alpha t)$$

где  $l_0$  - длина тела при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - средний температурный коэффициент линейного расширения тела,  $\text{K}^{-1}$ .



(а)



(б)

Рис. 6.2. Механические термометры а-биметаллический, б-стержневой.

Дилатометрические термометры не получили распространения как самостоятельные приборы, а используются главным образом в качестве чувствительных элементов в сигнализаторах температуры.

Дилатометрическими и биметаллическими термометрами измеряется температура в пределах от  $-150$  до  $+700^\circ\text{C}$  (погрешность  $1-2,5\%$ ).

#### 6.4 МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие манометрических термометров основано на зависимости давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. Указанные термометры являются промышленными показывающими и самопишущими приборами, предназначенными для измерения температуры в диапазоне до  $600^\circ\text{C}$ . Класс точности их  $1 - 2,5$ . В зависимости от заключенного в термосистеме рабочего вещества манометрические термометры разделяются на газовые, жидкостные и конденсационные. Выбор рабочего вещества производится исходя из заданного диапазона показаний и условий измерения.

#### 6.5 ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для измерения температуры широкое применение получили термометры сопротивления (рис. 6.3.), действие которых основано на изменении электрического сопротивления металлических проводников в зависимости от температуры. Из числа чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина (Pt) и медь (Cu). Металлы, применяемые для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивлений, не должны окисляться, обладать достаточно высоким удельным электрическим сопротивлением и линейной зависимостью сопротивления от температуры:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha t).$$

Этим требованием удовлетворяют платина и медь.

Термопреобразователи сопротивления имеют большую инерционность (постоянные времени  $T_1, T_2, T_3 = 2 \dots 240 \text{ с}$ ), их динамические свойства описываются передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Термометры сопротивления нашли большое применение в химической и пищевой промышленности. Их достоинства: возможности дистанционного измерения температуры с высокой точностью, централизованного контроля и регулирования температуры. Применяются *технические* (промышленные), *образцовые* и *эталонные* платиновые термометры сопротивления.

Степень чистоты платины характеризуется отношением  $R_{100}/R_0$ , где  $R_0$  и  $R_{100}$  - сопротивления термометра при 0 и 100° С. Для спектрально чистой платины это отношение равно 1,3925, а для платины, применяемой при изготовлении образцовых термометров 2-го разряда и технических термометров, 1,391.



Рис. 6.3. Термометр сопротивления

К достоинствам меди относятся ее дешевизна, легкость получения в чистом виде и сравнительно высокий температурный коэффициент электрического сопротивления. Недостатками ее являются небольшое удельное сопротивление и легкая окисляемость при высоких температурах, конечный предел применения медных термометров сопротивления ограничивается температурой 180° С. Для меди, применяемой при изготовлении термометров сопротивления, отношение  $R_{100}/R_0$  равно 1,426. Стандартные технические термометры сопротивления изготавливаются из платины и меди. Платиновые термометры сопротивления имеют обозначение **ТСП**, а медные - **ТСМ**. При температуре 0°С сопротивление  $R_0$  термометров равно: платиновых 10, 50 или 100 Ом и медных 50 или 100 Ом.

В последние годы для измерения температуры применяют полупроводниковые термопреобразователи сопротивления. Полупроводниковые термометры сопротивления - *терморезисторы*, изготавливаемые из порошкообразной смеси окислов некоторых металлов: меди ( $\text{Cu}_2\text{O}_3$ ), марганца ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), кобальта ( $\text{CoO}$ ), никеля ( $\text{NiO}$ ) и др.,

спрессованной и спеченной при высокой температуре. Наиболее распространены для измерения и регулирования температуры терморезисторы типов КМТ (смесь окислов кобальта и марганца) и ММТ (смесь окислов меди и марганца).

## 6.6 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие термоэлектрических термометров основано на свойстве металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (термо- э.д.с.), зависящую от температуры места соединения (спая) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов), образующих чувствительный элемент термометра — термопару (рис 6.4.). Располагая законом изменения термо-э.д.с. термометра от температуры и определяя значение термо-э.д.с. электроизмерительным прибором, можно найти искомое значение температуры в месте измерения.

При соединении одинаково нагретых концов двух проводников из разнородных материалов, из которых в первом количество свободных электронов в единице объема больше, чем во втором, последние будут диффундировать из первого проводника во второй в большем числе, чем обратно. Таким образом, первый проводник станет заряжаться положительно, а второй — отрицательно.

Кроме того, термо-э.д.с. возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния подвижного равновесия положительно заряжается более нагретый конец проводника как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым

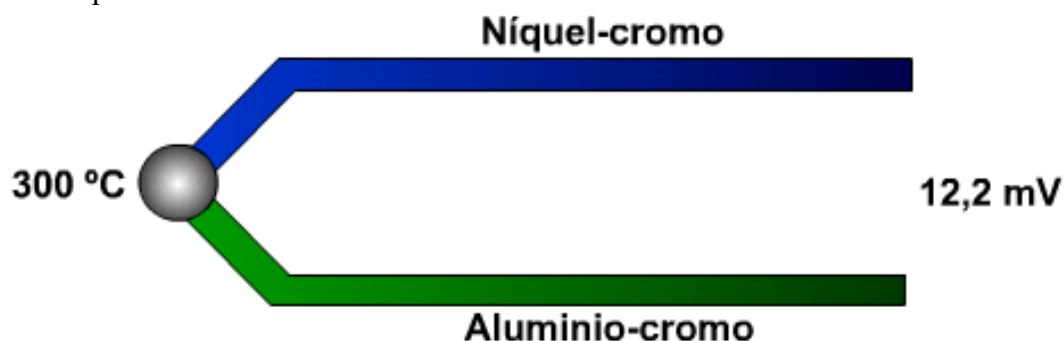


Рис. 6.4.Термопара

При температуре спая нихрома и алюминий-хрома равной  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  термоэдс составляет  $12,2\text{ мВ}$ .

В качестве вторичных приборов, работающих с термоэлектрическими термометрами, применяются магнитоэлектрические милливольтметры и потенциометры.

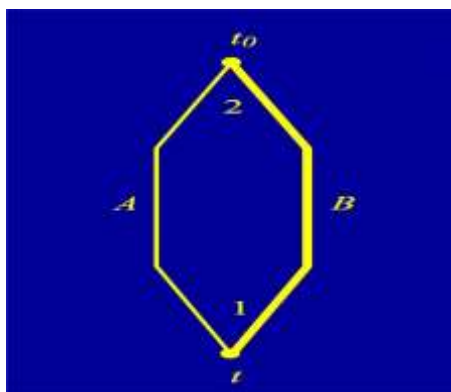


Рис. 6.5.Схема работы термопары

В замкнутом контуре термоэлектрического термометра, состоящем из разнородных термоэлектродов  $A$  и  $B$  (рис.6.5.), одновременно действуют оба указанных выше фактора, вызывающие появление в спаях 1 и 2 (спай 1, погружаемый в измеряемую среду, называется *рабочим концом* термоэлектрического термометра, а спай 2 - *свободным концом*) в зависимости от их температур  $t$  и  $t_0$  и материала термоэлектродов двух суммарных термо-э.д.с.  $e_{AB}(t)$  и  $e_{BA}(t_0)$ , взятых при обходе контура против часовой стрелки. Создаваемая термометрами термо-э.д.с. сравнительно невелика; она составляет не более 8 мВ на каждые 100 °С и при измерении высоких температур не превышает 70 мВ.

## 6.7 ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры излучения (рис.6.6.) работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, изменяющейся в зависимости от температуры этих тел.

Пирометры могут выступать в роли средства безопасного дистанционного измерения температур раскаленных объектов, что делает их незаменимыми для обеспечения должного контроля в случаях, когда физическое взаимодействие с контролируемым объектом невозможно из-за высоких температур. Их можно применять в качестве теплолокаторов (усовершенствованные модели), для определения областей критических температур в различных производственных сферах.

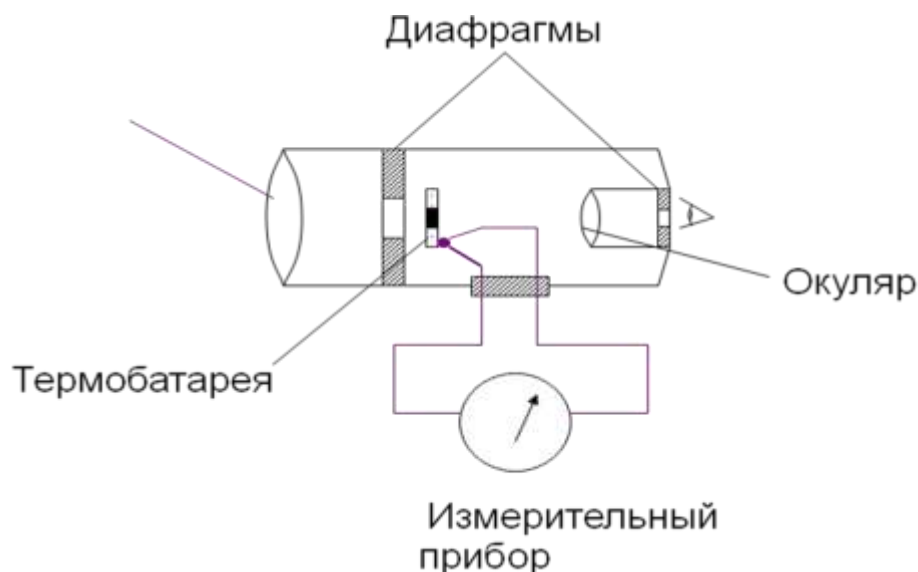


Рис. 6.5. Пирометр излучения.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.

1. Термоэлектрические термометры. Милливольтметры. Потенциометры.
2. Термометры сопротивления.
3. Манометрические термометры. Термометры расширения.
4. Термопары.
5. Пирометры излучения.

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## ЛЕКЦИЯ 7. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ, ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ.

### 7.1 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ВИДЫ ДАВЛЕНИЯ

Пусть на поверхность какого-либо тела действует сила. Она должна быть равномерно распределена по поверхности и действовать по нормали к ней.

Д а в л е н и е м называется отношение силы, действующей по нормали к поверхности тела, к площади этой поверхности. Сила должна быть равномерно распределена по поверхности.

Единицы измерения:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$  (система СИ),

$$1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па},$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9.8 \text{ ПА},$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133.3 \text{ Па}.$$

При измерении различают: атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давления.

Атмосферным (барометрическим) называется давление  $P_{атм}$ , создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы. Оно имеет переменное значение, зависящее от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий (погоды).

Абсолютным  $P_{абс}$  называется полное давление жидкости или газа.

Избыточным  $P_{изб}$  называется давление, равное разности между давлением среды и атмосферным давлением:

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{атм}, \quad P_{изб} > P_{атм}.$$

Вакуумметрическое давление  $P_{вак}$  среды характеризует давление (вакуум), недостающее до атмосферного давления:

$$P_{вак} = P_{атм} - P_{абс}, \quad P_{абс} < P_{атм}.$$

Полное давление. Движущаяся среда характеризуется полным давлением  $P_{пол}$ . Оно равно сумме статического  $P_{ст}$  и динамического  $P_{дин}$  давлений, т. е.

$$P_{пол} = P_{ст} + P_{дин}.$$

Статическое давление потока может быть избыточным, вакуумметрическим и атмосферным.

Динамическое давление, зависящее от скорости потока (скоростной напор) для жидкости, а также для газа и пара при умеренных скоростях определяется по формуле:

$$P_{дин} = \frac{\rho \cdot V^2}{2},$$

где  $V$  - скорость движения вещества, м/с;  $\rho$  - плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

### 7.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Измерение давления основывается главным образом на уравнивании действующего усилия при помощи столба жидкости или за счет упругой деформации различных чувствительных элементов.

Приборы для измерения давления делятся на следующие группы:

барометры - для измерения атмосферного давления;

манометры избыточного давления - для измерения давления выше атмосферного;

вакуумметры - для измерения вакуумметрического давления;

манометры абсолютного давления - для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля;

дифференциальные манометры - для измерения разности двух давлений (перепада давления).

подавляющее количество приборов, применяемых для измерения давления, являются манометрами избыточного давления, которые по принципу действия разделяются на жидкостные, деформационные, грузопоршневые, электрические.

### 7.3 ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ

В этих приборах величиной, характеризующей измеряемое давление, служит видимая высота столба (уровень) уравнивающей жидкости в стеклянной измерительной трубке. К приборам этого вида относятся однотрубные (чашечные) и двухтрубные (U-образные) манометры.

В этих манометрах в качестве уравнивающей жидкости используются ртуть, дистиллированная вода или этиловый спирт. Наиболее часто применяется двухтрубный манометр (рис.7.1), состоящий из стеклянных измерительных трубок 1 и 2, соединенных внизу и укрепленных на вертикальном основании. Между трубками помещена миллиметровая шкала с нулевой отметкой посередине.

Измерительные трубки заполняются уравнивающей жидкостью до нулевой отметки шкалы. Трубка 1 сообщается резиновой трубкой с измеряемой средой, находящейся под абсолютным давлением  $P_{абс}$ , а трубка 2 - с атмосферой, имеющей давление  $P_{атм}$ . Обычно трубка 1, связанная со средой большего давления, обозначается знаком + (плюсовая трубка), а трубка 2,

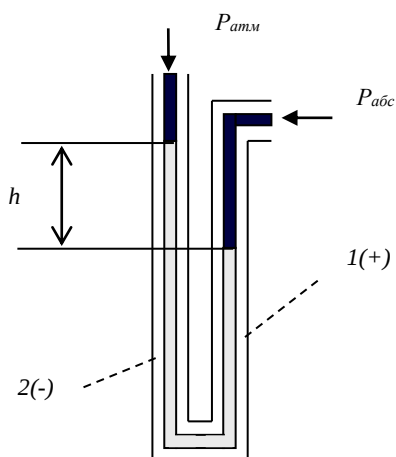


Рис. 7.1. Двухтрубный манометр

связанная со средой меньшего давления, знаком - (минусовая трубка). Легко показать, что избыточное давление

$$P_{изб} = \rho g h.$$

Передаточная функция жидкостных манометров

$$W(p) = \frac{h(p)}{P_{изб}(p)} = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}.$$

Жидкостные манометры являются весьма простыми и точными приборами, служащими для определения небольших избыточных давлений, не превышающих 0,2 МПа. Они широко применяются при исследовательских и наладочных работах.

### 7.4 ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРЫ

Их принцип действия основан на использовании деформации упругого чувствительного элемента, возникающей под влиянием измеряемого давления. Значение этой деформации передается отсчетному устройству прибора, градуированному в единицах давления.

Чувствительные элементы деформационных манометров для измерения давления до 60 МПа (трубчатой пружины, мембраны, сильфона) изготавливаются из дисперсионно-твердеющих сплавов (до температуры 200°C) и бериллиевой бронзы (до 100°C).

Трубчато-пружинные манометры изготавливаются с одновитковой трубчатой пружиной овального сечения. Под действием измеряемого давления внутри трубки она частично раскручивается вследствие деформации ее сечения, которое стремится принять форму

круга. Это вызывает перемещение ее свободного конца, связанного при помощи передаточного механизма с указательной стрелкой.

Статическая характеристика трубчатой пружины линейная, ее динамические свойства описываются передаточной функцией аperiodического звена 2-го порядка. Примеры деформационных манометров, основанных на использовании мембран и сильфонов, показаны на рис.7.2.

Деформационные манометры получили широкое применение для измерения избыточного давления жидкости, газа и пара. Это объясняется следующими их достоинствами:

- простотой и надежностью конструкции,
  - высокой точностью,
  - наглядностью показаний,
  - малыми габаритами;
  - большим диапазоном измерений,
- возможностью автоматической записи и дистанционной передачи показаний

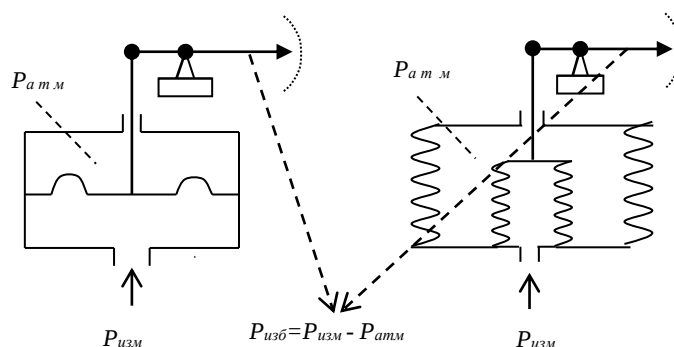


Рис. 7.2. Мембранный и сильфонный манометры

Электрические манометры основаны на использовании зависимостей электрических параметров их чувствительных элементов от измеряемого давления среды (см.рис.7.3)

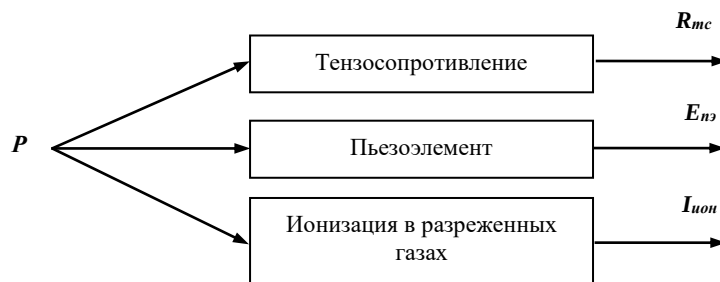


Рис. 7.3. Электрические манометры

## 7.5 ЕДИНИЦЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

Расходом вещества называется количество вещества, проходящее в единицу времени по трубопроводу, каналу и т. п.

Количество и расход вещества выражают в объемных или массовых единицах измерения. Единицами объемного расхода являются  $м^3/с$  ( $л/с$ ), а массового -  $кг/с$  ( $г/с$ ).

Приборы, измеряющие расход, называются расходомерами. В зависимости от рода измеряемого вещества они делятся на расходомеры воды, пара, газа и пр. Расходомеры бывают показывающими и самопишущими.

К приборам, измеряющим количество, относятся счетчики и весы. С их помощью определяется количество вещества, прошедшего по тракту за известный промежуток времени, для чего отсчитываются показания прибора в начале и конце периода измерения и вычисляется

разность этих показаний. Часто для определения количества вещества используются расходомеры, для этого их выходной сигнал интегрируется.

Для определения расхода и количества жидкости, газа, пара и сыпучих тел в химической промышленности применяются следующие основные методы измерений: переменного перепада давления, скоростной, и др.

В соответствии с применяемыми методами измерений расхода и количества вещества измерительные приборы разделяются в основном на следующие группы: расходомеры переменного перепада давления (с сужающим устройством); расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры); электромагнитные расходомеры; скоростные расходомеры и счетчики; объемные счетчики; автоматические весы.

## 7.6 РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ (С СУЖАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ)

Для измерения расхода жидкости, газа и пара, протекающих по трубопроводам, широкое применение получили расходомеры с сужающим устройством (см. рис. 7.4). Принцип действия их основан на изменении потенциальной энергии измеряемого вещества при протекании через искусственно суженное сечение трубопровода.

Расходомер состоит из сужающего устройства, устанавливаемого в трубопроводе и служащего для местного сжатия струи (первичный преобразователь), дифференциального манометра, предназначенного для измерения разности статических давлений протекающей среды до и после сужающего устройства (вторичный прибор), и соединительных линий (двух трубок), связывающих между собой оба прибора.

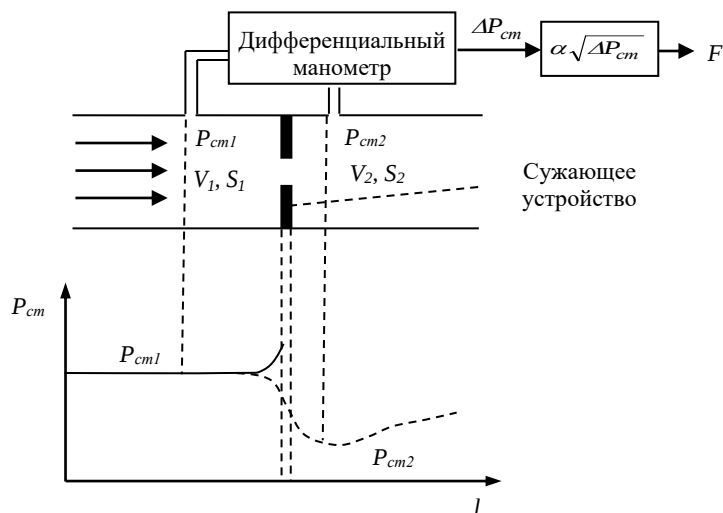


Рис. 7.4. Расходомеры переменного перепада давления (с сужающим устройством)

Сужающее устройство обычно имеет круглое отверстие, расположенное концентрично относительно стенок трубы, диаметр которого меньше внутреннего диаметра трубопровода. Оно существенно изменяет характеристики потока непосредственно за сужающим устройством. Для пояснения принципа работы расходомера запишем следующие уравнения:

1) Уравнение непрерывности струи:

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2, \quad (V_1 = \frac{S_2}{S_1} \cdot V_2).$$

2) Закон сохранения энергии:

$$P_{cm.1} + P_{дин.1} = P_{cm.2} + P_{дин.2} \quad \text{или}$$

$$P_{ст.1} - P_{ст.2} = \Delta P_{ст} = P_{дин.2} - P_{дин.1} =$$

$$= \frac{\rho V_2^2}{2} - \frac{\rho V_1^2}{2} = \frac{\rho V_2^2}{2} - \frac{\rho S_2^2 V_2^2}{2 S_1^2} = k \cdot V_2^2$$

3) Объемный расход:

$$F = S_2 V_2 = \alpha \sqrt{\Delta P_{ст}}.$$

Дифференциальный манометр (дифманометр-расходомер) выполняется показывающим или самопишущим и дополнительно может иметь встроенный интегратор. Шкала промышленного дифманометра-расходомера градуируется в объемных или массовых единицах расхода.

### 7.7 ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ

Принцип действия этих устройств основан на использовании зависимости скорости движения тел - чувствительных элементов, помещенных в поток, от расхода вещества, протекающего через расходомеры (см.рис.7.5).

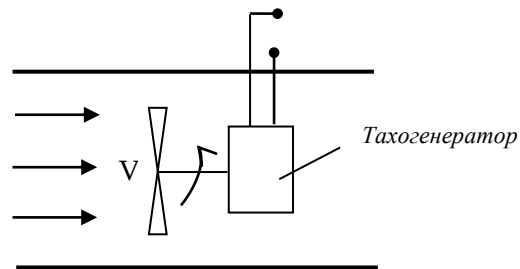


Рис.7.5. Схема тахометрического расходомера

В турбинных тахометрических расходомерах чувствительными элементами являются вращающиеся под действием потока жидкости или газа турбины-крыльчатки, располагаемые горизонтально или вертикально. Камерные тахометрические расходомеры представляют собой один или несколько подвижных элементов, отмеривающих или отсекающих при своем движении определенные объемы жидкости или газа.

### 7.8 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ (ИНДУКЦИОННЫЕ) РАСХОДОМЕРЫ

Эти устройства предназначены для измерения расхода различных жидких сред, в том числе пульп с мелкодисперсными неферромагнитными частицами удельной электропроводностью не ниже  $5 \cdot 10^2$  см/м, протекающих в закрытых и полностью заполненных трубопроводах. Широко применяются в разных отраслях промышленности.

Измерительный преобразователь расхода электромагнитного расходомера (рис. 7.6) состоит из немагнитного участка трубопровода 3 с токосъемными электродами 4 и электромагнита 2 с обмоткой возбуждения 1, охватывающего трубопровод.

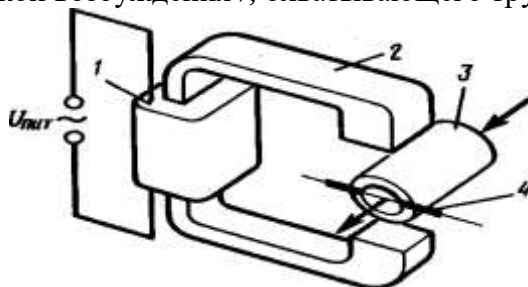


Рис.7.6. Измерительный преобразователь электромагнитного расходомера

При протекании электропроводных жидкостей по немагнитному участку трубопровода 3 через однородное магнитное поле, создаваемое электромагнитом 2, в жидкости, которую можно представить как движущийся проводник, возникает электродвижущая сила, снимаемая электродами 4. Эта ЭДС прямо пропорциональна средней скорости потока:

$$E = B l V_{\text{ср}}$$

где  $B$  - магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита;  $l$  - расстояние между электродами;  $V_{\text{ср}}$  - средняя скорость движения потока.

Эта ЭДС, представляющая собой сигнал, пропорциональный расходу, поступает в измерительный блок (на рисунке не показан), где он преобразуется и подается к измерительному или управляющему устройству.

## 7.9 НАПОРНЫЕ ТРУБКИ

При помощи напорных трубок производится определение расхода жидкости или газа (воздуха) путем измерения динамического давления  $P_{\text{дин}}$  потока, которое является разностью между полным  $P_{\text{пол}}$  и статическим  $P_{\text{ст}}$  давлениями среды (см. рис.7.7). По измеренному трубкой давлению  $P_{\text{дин}}$  вычисляется скорость потока  $V$  (м/с).

Для определения расхода по скорости движения необходимо знать ее среднее значение для поперечного сечения потока. По внешнему виду напорные трубки разделяются на угловые и стержневые.

Угловая трубка состоит из измерительного цилиндра который устанавливается параллельно оси трубопровода концом навстречу потоку, вследствие чего через торцевое отверстие передается полное давление среды.

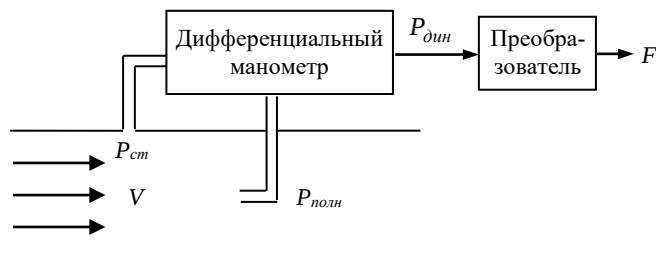


Рис.7.7 Расходомеры с напорной трубкой

Принцип действия объемных счетчиков основан на измерении объема проходящего через прибор вещества и суммирования результатов этих измерений. Счетчики с овальными шестернями (рис. 7.8) применяются для измерения количества жидкости в широком диапазоне вязкости.

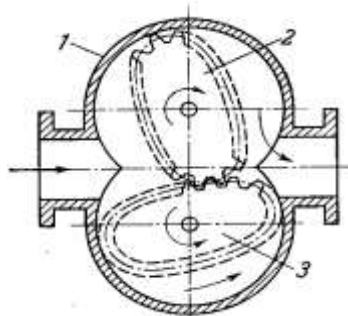


Рис. 7.8. Схема счетчика жидкости с овальными шестернями

Счетчик измеряет объем жидкости, заключенной между стенками измерительной камеры 1 и овальными шестернями 2 и 3, при вращении последних под влиянием разности давлений измеряемой жидкости до и после счетчика. Овальные шестерни, находящиеся между собой в непрерывном зацеплении, при вращении обкатывают друг друга. В зависимости от положения шестерен каждая из них поочередно является ведущей и ведомой. Размер зазоров между шестернями и стенками измерительной камеры не превышает 0,04—0,06 мм, вследствие чего погрешность измерения из-за перетекания через них жидкости невелика. Количество жидкости, прошедшее через счетчик, учитывается по числу оборотов одной из его шестерен, связанной со счетным стрелочно-роликовым указателем. Счетчики устанавливаются в горизонтальных трубопроводах, причем оси вращения шестерен располагаются горизонтально, а круговой циферблат - вертикально с нулевой отметкой шкалы вверху (на рис. 13.10 не показан). Для предохранения счетчика от попадания твердых частиц перед ним устанавливается сетчатый фильтр.

### 7.10 ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ, ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ

Наиболее простым устройством для измерения уровня жидкости в открытых (сообщающихся с атмосферой) и закрытых (находящихся под давлением) резервуарах (баках) является указательное стекло (трубка). Однако при высоком или низком расположении резервуара относительно места наблюдения пользоваться указательным стеклом затруднительно. В таких случаях применяются специальные уровнемеры, в частности, - поплавковые, мембранные, гидростатические, электрические, акустические и радиоизотопные.

#### Поплавковые уровнемеры

Существует большое разнообразие типов и модификаций поплавковых уровнемеров и сигнализаторов, различающихся по конструкции, характеру измерения (непрерывное или дискретное), пределам измерения, условиям применения, системе дистанционной передачи и т. п. Принцип их действия основан на использовании перемещения поплавка на поверхности жидкости. Это перемещение механически или с помощью системы дистанционной передачи передается к измерительной части прибора.

#### Гидростатические уровнемеры

В гидростатических приборах измерение уровня жидкости постоянной плотности сводится к измерению гидростатического давления столба жидкости.

Гидростатические (пневмометрические, барботажные) уровнемеры представляют собой открытую с одного конца измерительную трубку, опускаемую в резервуар с жидкостью, уровень которой измеряется (рис.7.9). Через эту трубку продувается воздух, который барботирует через жидкость в виде пузырьков. Давление воздуха в трубке  $P$  является мерой уровня жидкости. При этом следует учитывать влияние плотности жидкости  $\rho$ . Так как  $P = \rho g h$ , то при известной

плотности  $h = P / (\rho g)$ .

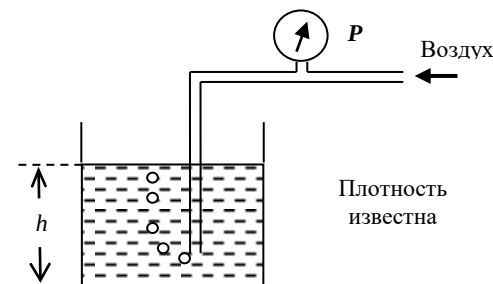


Рис.7.9. Гидростатический уровнемер

### Электрические уровнемеры

Из электрических уровнемеров наибольшее распространение нашли омические и емкостные. В омических уровнемерах используются электропроводимость среды, в емкостных - её диэлектрические свойства.

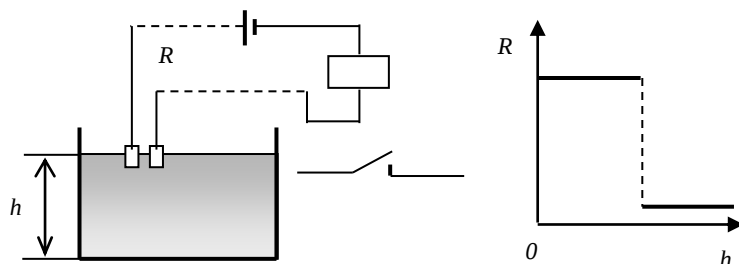


Рис.7.10. Омический датчик полного бака

На рис.7.10 представлена схема омического датчика полного бака. При достижении жидкостью верхнего уровня бака омическое сопротивление датчика резко уменьшается, реле срабатывает, выключая насос, включая систему сигнализации.

Схема емкостного уровнемера представлена на рис.7.11. Чувствительным элементом здесь является конденсатор, между обкладками которого находится жидкость. При изменении уровня меняется емкость конденсатора. Для измерения емкости обычно используется электрический мост переменного тока.

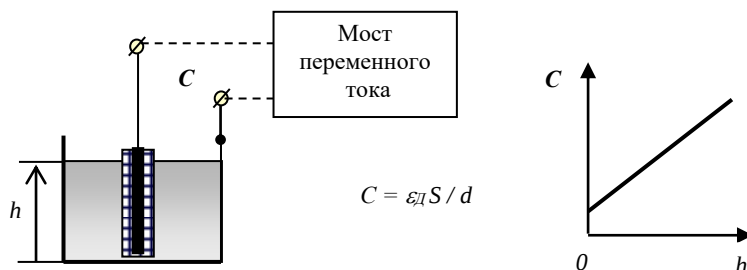


Рис.7.11. Емкостной уровнемер

Перспективно применение ультразвуковых и акустических уровнемеров, не имеющих контакта с измеряемой средой. Их действие основано на использовании принципа отражения ультразвуковых волн от границы раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями. В ультразвуковых уровнемерах используют принцип отражения ультразвуковых колебаний со стороны жидкой фазы, а в акустических - со стороны газовой фазы. Их недостатки - сложность конструкции и дороговизна.

Измерения, связанные с анализом состава и свойств веществ, основаны на использовании зависимостей между составом анализируемого вещества (или концентрациями его компонентов) и величинами, характеризующими его физические или физико-химические параметры.

Плотность жидкости является одним из показателей (параметров), характеризующих ее свойства. Плотность—это масса вещества, заключенная в единице объема.

### Весовые плотномеры

Эти приборы основаны на измерении массы анализируемой жидкости определенного объема, которая является функцией ее плотности. Конструктивно они выполняются в виде мерной камеры определенного объема, масса которой измеряется.

### Поплавковые плотномеры

Приборы основаны на изменении степени погружения поплавка, являющейся функцией плотности анализируемой жидкости. При погружении в жидкость полупогруженного тела (поплавка) согласно закону Архимеда на него будет действовать выталкивающая сила, равная массе вытесненной им жидкости.

В лабораторной и производственной практике широко используются поплавковые приборы, предназначенные для эпизодических измерений, так называемые ареометры. Они могут быть стеклянными или металлическими и самой разнообразной формы. В пищевой промышленности применяется большая группа плотномеров автоматических, использующих поплавковый (ареометрический) принцип измерения.

В поплавковом плотномере (рис.7.12.) анализируемая жидкость подводится в измерительную камеру через входной патрубок и отводится через выходной сливной.

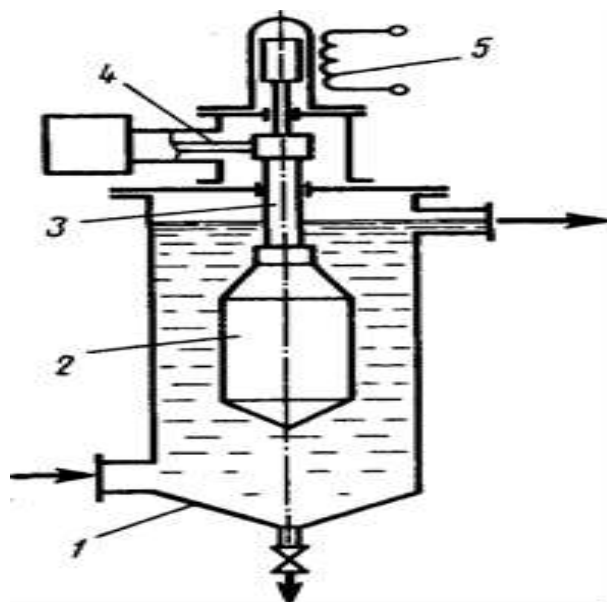


Рис.7.12. Автоматический поплавковый плотномер

отводится через выходной сливной. Поплавок 2, полностью погруженный в жидкость, с помощью штока 3 соединен с торсионной трубкой (пружиной) 4. Усилие, создаваемое на ней, уравнивает выталкивающую силу поплавка. Торсионная трубка соединена также с сердечником электрического преобразователя 5, к которому подключается измерительный прибор.

### Гидростатические плотномеры

Принцип их действия основан на измерении давления столба однородной анализируемой жидкости определенной высоты, пропорционального ее плотности. Эта зависимость выражается следующим уравнением:

$$P = \rho g h,$$

где  $P$  — давление столба жидкости, Па;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  — высота столба жидкости, м.

При неизменной высоте столба жидкости  $h$  давление  $P$  является мерой ее плотности. Известны гидростатические плотномеры с чувствительными элементами в виде мембран или сильфонов и с продувкой воздухом, называемые пневмометрическими.

Гидростатические пневмометрические плотномеры с продувкой воздухом основаны на принципе, суть которого ясна из схемы, приведенной на рис. 7.13. Через трубку,

погруженную открытым концом в анализируемую жидкость на постоянную глубину  $H$ , продувают (барботируют) воздух. К трубке подключен измерительный прибор — чувствительный манометр, давление в котором прямо пропорционально плотности контролируемой жидкости.

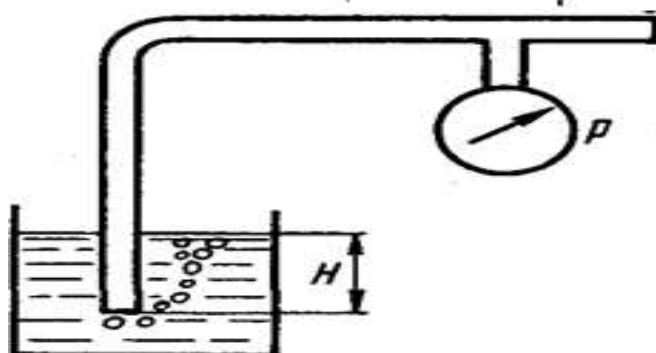


Рис.7.13.. Схема пневмометрического измерения плотности жидкости.

#### Радиоизотопные плотномеры

Измерение плотности различных сред этими плотномерами основано на зависимости степени ослабления ионизирующего излучения, прошедшего через анализируемую среду, от плотности этой среды (см. рис.7.14.).

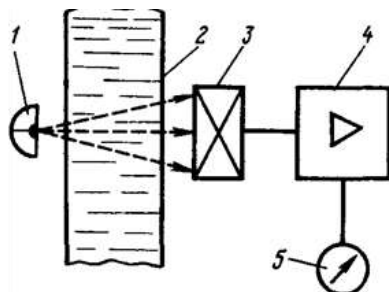


Рис.7.14.. Радиоизотопный плотномер

В радиоизотопном плотномере (рис.8.6.) пучок  $\gamma$ -излучения от источника 1 проходит через анализируемую жидкость 2, протекающую по трубопроводу или находящуюся в сосуде, и попадает на приемник излучения (детектор) 3. При изменении плотности жидкости изменяется интенсивность излучения, попадающего на приемник 3. Полученный сигнал далее подается на усилитель 4, а затем и на измерительный прибор 5.

#### Измерение вязкости жидкостей

Вязкость — один из параметров, определяющих состав и качество жидкостей. Она характеризует силу сопротивления при относительном перемещении двух слоев жидкости:

$$F_{\text{вязк}} = \eta \cdot S \cdot \frac{(V_2 - V_1)}{(x_2 - x_1)}$$

где  $S$  — площадь поверхности соприкосновения слоев [м<sup>2</sup>];

$V_1, V_2$  — скорости течения слоев [м/с];

$x_1, x_2$  — поперечные координаты слоев [м];

$\eta$  — коэффициент вязкости [Н с / м<sup>2</sup>].

В биотехнологии в ходе процесса ферментации вследствие роста и размножения микроорганизмов повышается вязкость ферментационной среды. При конкретных условиях этот параметр можно использовать для оценки концентрации биомассы или продуктов. Обычно культуральные жидкости по реологическим свойствам относят к неньютоновским жидкостям. Вместе с тем ряд биосуспензий с участием дрожжей и бактерий обладают свойствами ньютоновской жидкости и к ним может быть применима зависимость Эйнштейна:

$$\frac{h_S}{h_F} = \frac{1 + 0,5x}{(1 - x)^{-2}},$$

где  $h_S$  и  $h_F$  - вязкость культуральной среды при наличии и отсутствии в ней биомассы;  $x$  - объемная концентрация биомассы.

Измерение вязкости среды обычно с использованием капиллярных и ротационных вискозиметров.

#### Капиллярные вискозиметры

Вязкость жидкостей характеризуется динамическим коэффициентом вязкости — величиной, равной отношению силы внутреннего трения, которая действует на поверхности слоя жидкости при градиенте скорости, равном единице, к площади этого слоя. Для измерения вязкости служат вискозиметры.

Их действие основано на использовании закона Пуазейля для истечения жидкости из капиллярных трубок:

$$Q = \frac{\pi d^4}{\mu l} \Delta P,$$

где  $Q$  - объемный расход жидкости, вытекающей из трубки, м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>;  $d$  - диаметр трубки, м;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости жидкости, Па с;  $l$  - длина трубки, м;  $\Delta P$  - разность давлений между концами трубки, Па.

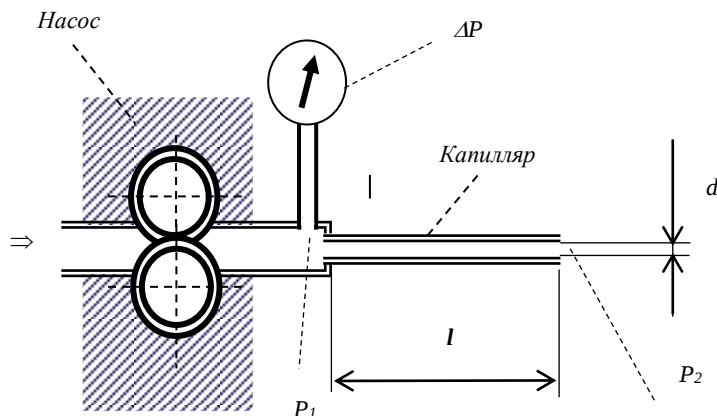


Рис.7.15 Капиллярный вискозиметр

В капиллярном вискозиметре (рис.7.15) постоянство значения расхода обеспечивается шестеренным насосом. Анализируемая жидкость проходит через капиллярную трубку диаметром  $d$  и длиной  $l$ . Перепад давления между входом и выходом трубки измеряется чувствительным дифференциальным манометром, градуированным в единицах вязкости.

Ротационные вискозиметры

Принцип их действия основан на измерении моментов сопротивления или крутящих моментов, передаваемых анализируемой жидкостью чувствительному элементу, которые являются функцией вязкости жидкости. Чаще других применяются приборы с коаксиальными цилиндрами, вращающимися телами и вращающимися параллельными дисками, погружаемыми в анализируемую жидкость.

Вискозиметр с коаксиальными цилиндрами (рис.7.16) представляет собой два цилиндра, между которыми помещается анализируемая жидкость. При вращении внешнего цилиндра 2 с постоянной скоростью от электродвигателя 1 жидкость приходит в стационарное вращательное движение и передает момент вращения внутреннему цилиндру 3. Для сохранения этого цилиндра в покое к нему должен быть приложен противоположный по знаку и равный по величине момент силы, создаваемый, как показано на рисунке, пружиной.

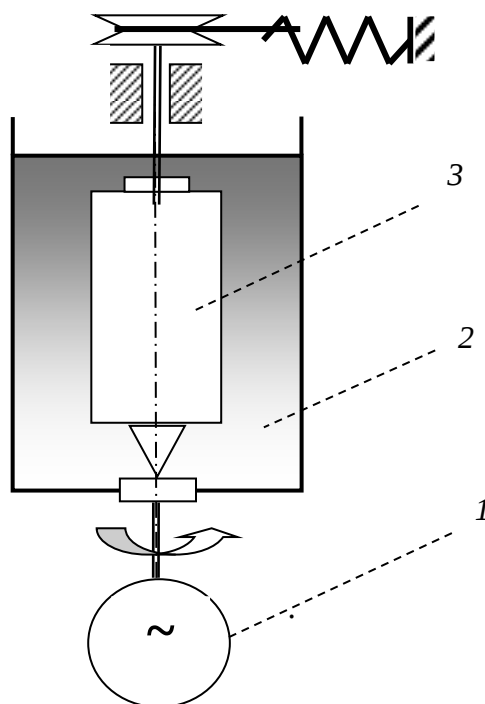


Рис.7.16. Ротационный вискозиметр с коаксиальными цилиндрами

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Деформационные манометры (мембранные, сильфонные, трубчатопружинные).
2. Электрические манометры (сопротивления, мембранноемкостные, пьезоэлектрические).
3. Приборы для измерения расхода и количества вещества (общие сведения). Счетчики.
4. Расходомеры переменного перепада давления.
5. Расходомеры динамического давления. Расходомеры постоянного перепада давления.
6. Расходомеры переменного уровня. Электромагнитные расходомеры.
7. Приборы для измерения уровня (поплавковые, гидростатические, мерные стекла).
8. Электрические уровнемеры.
9. Влагомеры (общие сведения, психрометры, весовые, кондуктометрические, потенциометрические, оптические).
10. Приборы для измерения плотности
11. Вискозиметры.

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
4. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

**ЛЕКЦИЯ 8.**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЕ СРЕДСТВ**  
**АВТОМАТИЗАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМАХ**  
**8.1 ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Процесс проектирования САУ, как и любой технической системы, можно разделить на ряд этапов.

Разработка и обоснование ТЗ, в процессе которого определяются цели и назначение системы. На этом этапе в курсовой работе проводится анализ технологического процесса, составляется его функциональная схема, дается обоснование выбора параметров измерения, регулирования и сигнализации, формулируются требования к системе.

Разработка технического предложения - выбор одного или нескольких вариантов построения САУ и дается оценка выполнимости требований ТЗ. В курсовой работе на этом этапе выбирают методы измерения технологических величин и технические средства автоматизации; размещают средства автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании, трубопроводах и т.д.; определяют способы информирования о состоянии технологического процесса и оборудования. Все выбранные решения оформляются в виде функциональной схемы автоматизации (ФСА).

Разработка эскизного проекта – этап анализа и синтеза САУ. В курсовой работе обосновывается выбор структуры математической модели ОУ, с помощью ЭВМ на основе экспериментальных данных идентифицируются ее параметры. обосновывается структура закона управления (ЗУ), осуществляется синтез его параметров (передаточных чисел) с помощью ЭВМ. Проводятся численные исследования эффективности замкнутой САУ, делается вывод о соответствии синтезированной системы заданным требованиям.

Техническое проектирование - разработка принципиальных электрических (электрокинематических, кинематических) схем отдельных блоков и анализ характеристик САУ с учетом разработанных и готовых блоков (датчиков, приводов, АЦП, ЦАП и др.).

Конструкторское проектирование - разработка рабочих чертежей опытного образца создаваемой САУ.

Технологическое проектирование и создание опытного образца.

Экспериментальное исследование опытного образца, в результате которого уточняется ранее разработанная конструкторская технологическая документация.

Процесс проектирования носит итерационный характер и выполняется до тех пор, пока не будут выполнены все условия ТЗ.

**8.2 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ**

Функциональной схемой автоматизации (ФСА) называется графическое изображение основных агрегатов оборудования технологического процесса, органов управления, средств автоматизации и связей между ними.

Стандарт устанавливает упрощенный и развернутый способы построения условных графических схем технологических процессов.

Упрощенный способ применяют для изображения на технологических схемах приборов и систем регулирования в целом, при этом способе многофункциональные приборы и средства автоматизации изображают в виде одного блока со своим условным обозначением.

Развернутый способ построения условных графических обозначений применяют для выполнения ФСА. В этом случае все приборы, блоки и элементы средств автоматизации показывают отдельными условными обозначениями.

Органы управления и средства автоматизации изображаются на ФСА в соответствии с ГОСТ 21-404-85 «Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах автоматизации технологических процессов». Применяются следующие условные обозначения:

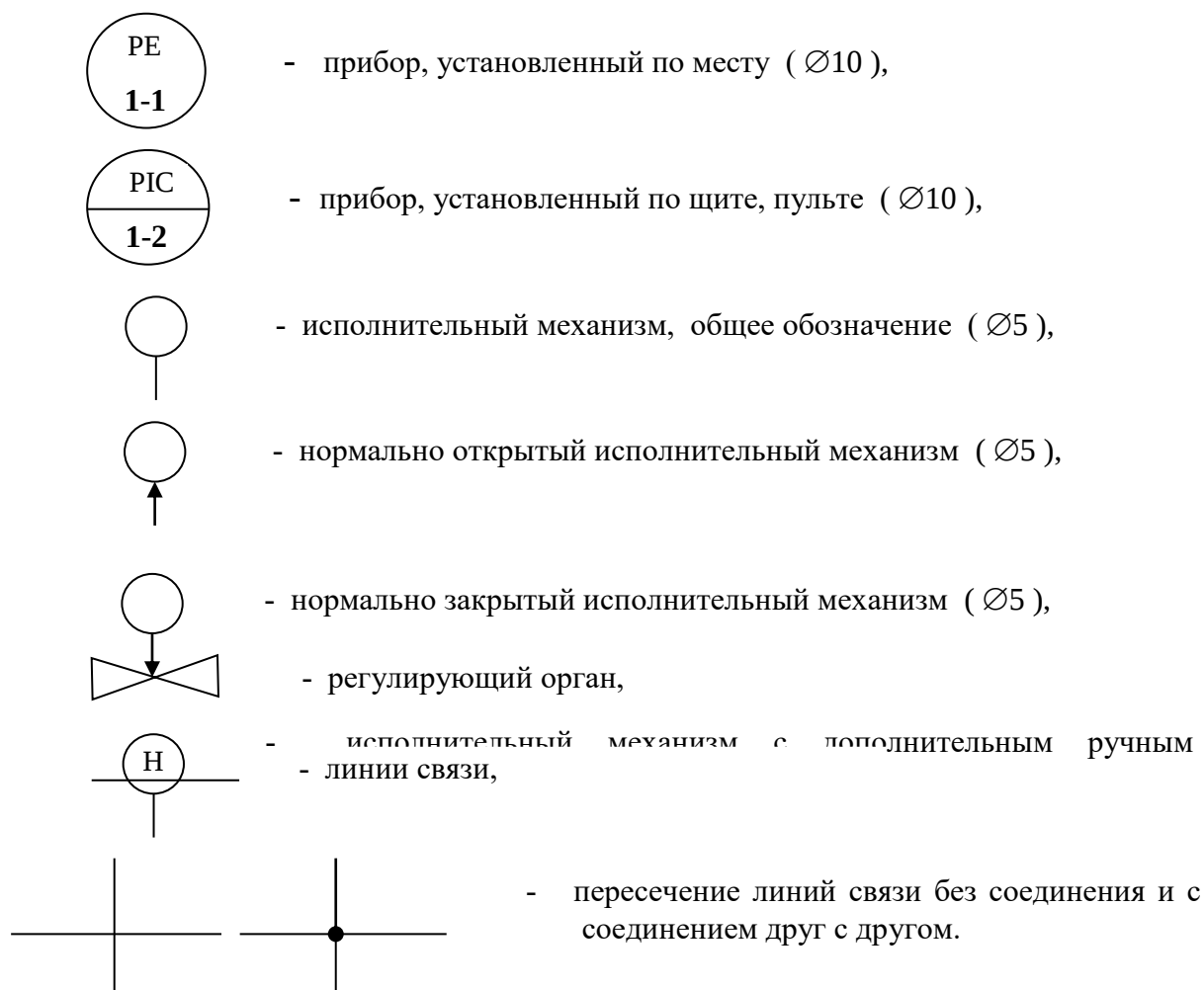


Рис.8.1. Обозначения условные приборов и средств автоматизации

### БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ

В верхней части графического изображения прибора (окружности) наносят буквенные обозначения, в нижней – нумерацию (цифровую или буквенно-цифровую).

Буквенные обозначения располагают слева направо в порядке, показанном на рис. 8.1.

Здесь необходимо руководствоваться следующими правилами:

На первом месте пишется буква, обозначающая измеряемую величину:

- T**, Температура
- P**, Давление, разряжение
- F**, Расход
- L**, Уровень
- Q**, Состав смеси, концентрация
- D**, Плотность
- M**, Влажность
- V**, Вязкость
- E**, Электрическая величина
- G**, Размер, положение, перемещение

**H**, Ручное воздействие

**K**, Временная программа

**R**, Радиоактивность

**W**, Масса

**S**, Скорость

**U**, Несколько разнородных величин

На втором месте пишется (при необходимости) одна из дополнительных букв: **E**, **T**, **K** или **Y**, например:

**TE** - первичный измерительный преобразователь температуры (термопара, термометр сопротивления и др.);

**FE** – первичный измерительный преобразователь расхода (сужающееся устройство расходомера, индуктивный датчик и др.);

**PT** – безшкальный манометр с дистанционной передачей показаний;

**FT** – безшкальный расходомер с дистанционной передачей показаний.

Далее пишутся буквы, обозначающие функциональные признаки прибора: основные:

**I**, Показание

**R**, Регистрация

**C**, Регулирование, управление

**S**, Включение, выключение

**A**, Сигнализация

дополнительные:

**E**, Чувствительный элемент

**T**, Дистанционная передача, преобразование сигнала

**K**, Станция управления

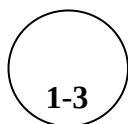
**Y**, Вычислительное устройство

При построении условных обозначений следует указывать только те функциональные признаки приборов, которые используются в данной схеме.

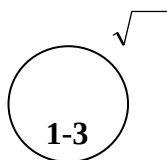
В обозначении каждого прибора, входящего в комплект данной схемы измерения или регулирования, первая буква должна быть одна и та же, так как она указывает измеряемую или регулируемую величину.

Дополнительные условные обозначения функциональных признаков приборов применяются для обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств. Расшифровка вида преобразования или операции, выполняемой вычислительным устройством, наносится справа от графического изображения прибора. Приведем примеры этих обозначений:

**E/P**



- электропневматический преобразователь температуры;



- вычислительное устройство, выполняющее операцию извлечения квадратного корня.

Для конкретизации измеряемой величины около изображения прибора (справа от него) указывают наименование или символ величины, например, «Напряжение», **pH**, **O<sub>2</sub>**.

Для обозначения величин, не предусмотренных данным стандартом, могут использоваться резервные буквы: **B**, **N**, **O**, например, **NS** – магнитный пускатель для включения электродвигателей. Эти обозначения должны быть расшифрованы на схеме.

В обозначениях устройств, предназначенных для ручных операций, на первом месте должна стоять буква **H**, например:

**НС** – переключатель электрических цепей, газовых (воздушных) линий;

**НС** – байпасные панели дистанционного управления;

**Н** - кнопки (ключи) для дистанционного управления, задатчики.

#### 8.4 РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ НА ФСА

На ФСА чувствительные элементы и первичные преобразователи систем измерения и регулирования располагают на схемах вблизи технологического оборудования или на трубопроводах.

Регулирующие органы с исполнительными механизмами изображаются на технологических трубопроводах.

Промежуточные преобразователи, приборы, регуляторы, сигнализаторы и т.п., устанавливаемые в цехе по месту оборудования на ФСА размещают в нижней части листа в прямоугольнике, озаглавленном слева: «Приборы местные».

Во втором прямоугольнике ниже изображаются средства автоматизации, устанавливаемые на пультах, щитах или помещении управления. Этот прямоугольник имеет слева заголовок «Щит».

На ФСА каждой схеме контроля и регулирования присваивается порядковый номер (арабскими цифрами), начиная слева по схеме начиная с номера 1, который записывается в нижней части графического изображения каждого из элементов этой схемы, в свою очередь каждому элементу схемы присваивается порядковый номер (арабскими цифрами) в направлении прохождения контролируемого сигнала от воспринимающего элемента до вторичного прибора или исполнительного устройства, например, при изображении регулятора давления (см.рис.8.2).

При изображении линий связи допускается:

- подводить их к условным обозначениям приборов и средств автоматизации с любой стороны – сверху, снизу, сбоку;
- наносить стрелки;
- разрывать их, нумеруя места разрыва одной и той же арабскими цифрами и располагая эти номера в горизонтальных рядах в возрастающем порядке слева направо.

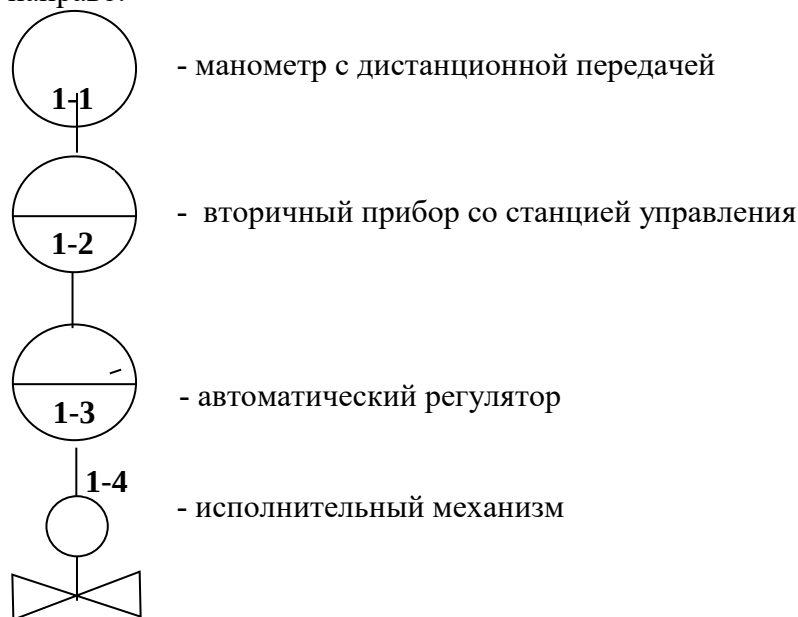


Рис.8.2. ФСА регулятора давления

При обозначении трубопроводов для жидкостей и газов применяют условные цифровые обозначения, например:

- 1- - вода,
- 2- – пар,
- 3- – воздух,
- 4- - азот,
- 5- - кислород,
- 27- -вакуум.

### 8.5 ПРИМЕРЫ ФСА

**Регулирование расхода.** Обычно управление расходом – это дросселирование потока с помощью клапана, изменение напора за счет изменения частоты вращения насоса или отвода части потока через дополнительные каналы (изменении степени байпасирования). Схема управления расходом показана на рис.8.3.

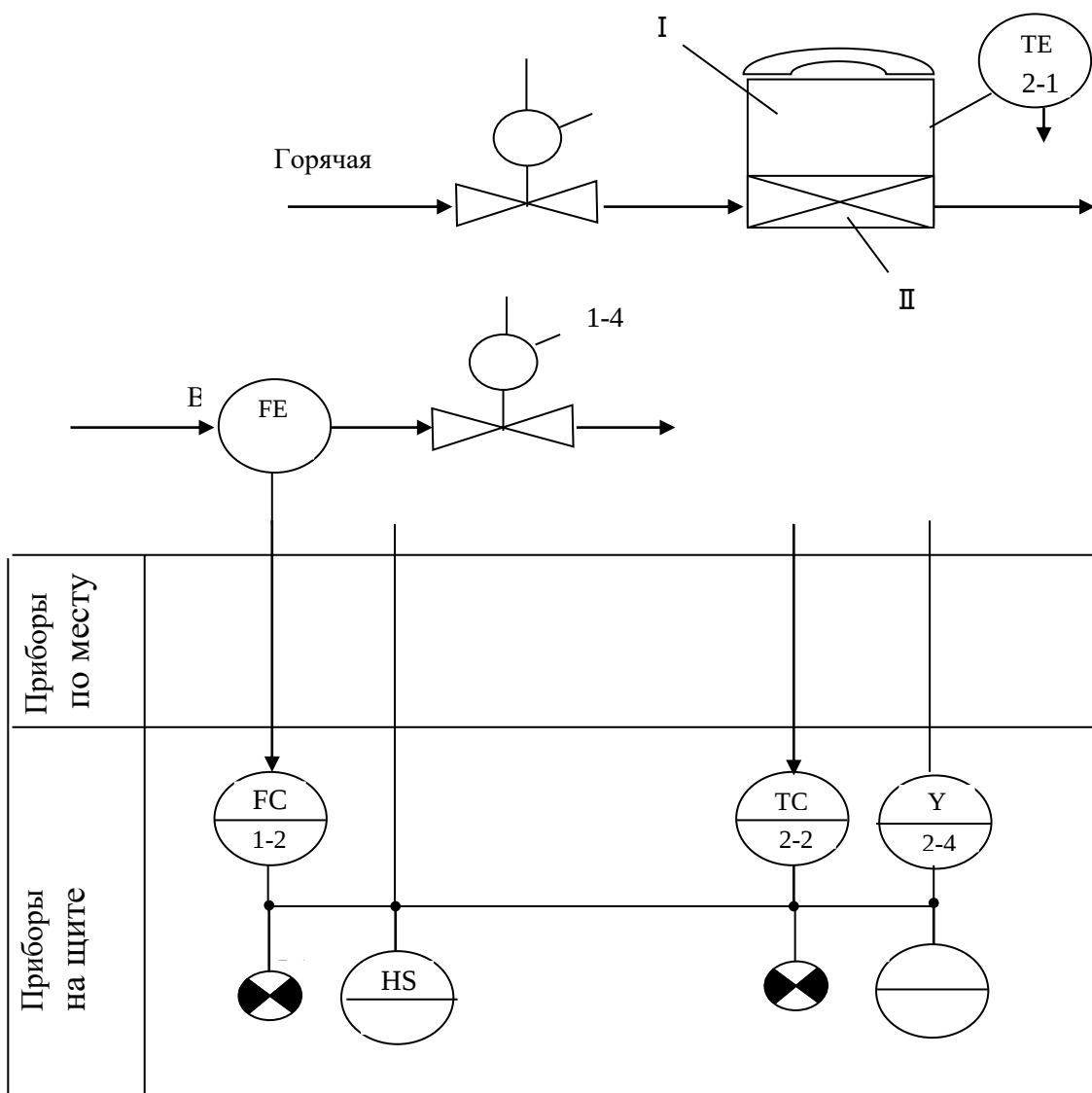


Рис.8.3. Функциональные схемы регулирования расхода воды и температуры:

- I - термобак; II - калорифер; 1-1, 2-1 - датчики расхода и температуры;
- 1-2, 2-2 – регуляторы расхода и температуры; 2-4 – преобразователь электрического сигнала в пневматический; 1-4, 2-5 – исполнительные механизмы.

Заданный расход здесь устанавливается с помощью задатчика расхода 1-3, текущее значение расхода измеряется датчиком 1-1 с электрическим преобразователем измеряемой величины; сигнал управления, формируемый регулятором расхода 1-2, подается на электрический клапан 1-4.

**Регулирование температуры.** Температура - показатель термодинамического состояния системы. Динамические характеристики системы зависят от физико-химических параметров процесса и конструкции термокамеры. Особенности таких систем – значительная инерционность объекта и нередко измерительного преобразователя. Типовая функциональная схема регулятора температуры показана на рис.2.3. Она включает датчик температуры 2-1, регулятор 2-2 с задатчиком температуры 2-3, преобразователь электрического сигнала в пневматический 2-4, пневмоклапан 2-5, изменяющий количество горячей воды, подаваемой в калорифер.

**Регулирование уровня.** Постоянство уровня свидетельствует о равенстве количества подаваемой и расходуемой жидкости. Это условие может быть обеспечено воздействием на подачу или расход жидкости. На рис. 8.4 показана функциональная схема регулирования уровня смеси воды и молока в системе приготовления колбасного фарша.

В емкости **I** установлены пять измерительных преобразователей уровня 8-1, представляющих собой металлические стержни. Величина отмеренного объема смеси соответственно 20, 40, 60, 80, 100 л определяется длиной измерительных преобразователей уровня, которые соединены с регулятором уровня 8-2. Сигнал на заполнение емкости **I** поступает на регулятор **8-2** в начале цикла дозирования мяса. Открытие пневматических клапанов молока **8-7** и воды **8-6** осуществляется сжатым воздухом через преобразователи **8-4** и **8-5**, на которые поступают электрические сигналы с регулятора **8-2**. Заданные значения объемов молока и воды устанавливаются оператором с помощью задатчика сначала задается объем молока, потом общий объем смеси.

После выгрузки фарша в фаршемешалку на регулятор **8-2** поступает электрический сигнал, который преобразуется в преобразователе **8-3** в пневматический и исполнительный механизм **8-8** открывается.

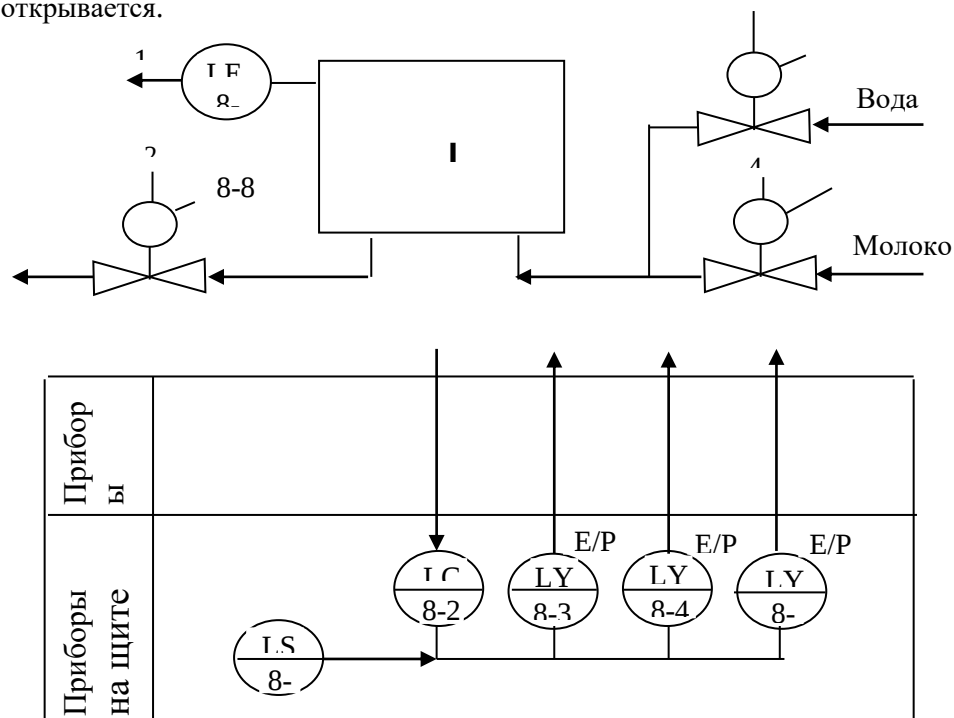


Рис.8.4. Функциональная схема регулирования уровня в емкости для дозирования воды и молока

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.**

1. Этапы проектирования САУ.
2. Как изображаются органы управления и средства автоматизации на ФСА в соответствии с ГОСТ 21-404-85.
3. Правила написания буквенных обозначений.
4. Правила написания цифровых обозначений.
5. Размещение приборов на ФСА.

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
3. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
2. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.

## ЛИТЕРАТУРА

### а) основная литература

1. Системы управления химико-технологическими процессами / Решетняк Е.П., Алейников А.К., Комиссаров А.В. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с.
2. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. М.: «Высшая школа», 2005. - 761 с.
3. Краснов А.Е., Злобин Л.А., Злобин Д.Л. Цифровые системы управления в пищевой промышленности. М.: «Высшая школа», 2007. - 671 с.
4. Решетняк Е.П. Электронный конспект лекций по дисциплине АСУТП. – Саратов: - СГАУ, 2009.
5. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтез систем./ Учебное пособие для вузов. - СПб.: - БХВ-Петербург, 2004. – 640с.
6. Беспалов А.В.. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.
7. Лабораторный практикум по дисциплине АСУТП / Решетняк Е.П., Алейников А.К. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2009. - 64с
8. Решетняк Е.П. Электронный конспект лекций по дисциплине АСУТП. – Саратов: - СГАУ, 2009.
9. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб. : Изд-во "Профессия", 2004. – 752 с.

### б) дополнительная литература

1. Автоматика и автоматизация производственных процессов мясной и молочной промышленности / Митин В.В., Усков В.И., Смирнов Н.Н. - М.: Агропромиздат, 1987. - 240с.
2. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Руководство к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.-44с.
3. Алейников А.К., Киселев В.А., Решетняк Е.П. Лабораторный практикум по дисциплине «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» Методическое пособие для студентов спец.:260303,260301.-Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»,2006.- 64с.
4. Алейников А.К., Борщевский А.С. АСУ ТП. Методические указания по курсовому проектированию для студентов спец. 260301-технология мяса и мясных продуктов, 260303-технология молока и молочных продуктов, ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». - Саратов,2006.- 72с
5. Автоматизация технологических процессов / Бородин И.Ф., Судник Ю.А.. - М.: Колос, 2003. -344с.
6. Бородин И.В., Суднин Ю.А. Автоматизация технологических процессов - М.: Колос, 2003.
7. Функциональные схемы автоматизации оборудования по переработке молока. Ч1: Учебное пособие для студентов специальности 260303 – «Технология молока и молочных продуктов» / Е.П. Решетняк, А.К. Алейников, Е.В. Полукаров; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2010. – 104 с.
8. Кожевников М.М., Никулин В.И. Технические средства АСУТП для пищевой промышленности: Справочное пособие по курсу «Автоматика, автоматизация и АСУТП» для студентов технологических специальностей пищевой промышленности. – Могилев: УО МГУП, 2008. – 95с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| ЛЕКЦИЯ 1 .....                                                                   | 3  |
| ВВОДНАЯ .....                                                                    | 3  |
| ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ, СТРУКТУРА КУРСА .....                                              | 3  |
| 1.1 КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....                                          | 3  |
| 1.2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....                              | 6  |
| 1.3 КЛАССИФИКАЦИЯ САУ .....                                                      | 8  |
| ЛЕКЦИЯ 2 .....                                                                   | 12 |
| СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ<br>ОБЪЕКТОВ И ЗВЕНЬЕВ УПРАВЛЕНИЯ ..... | 12 |
| 2.1 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА .....                                                 | 12 |
| 2.2 ОПЕРАТОР САУ .....                                                           | 14 |
| 2.3 ПОНЯТИЕ О СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ<br>САУ .....            | 15 |
| 2.4 ЕДИНИЧНАЯ СТУПЕНЧАТАЯ ФУНКЦИЯ .....                                          | 16 |
| 2.5 ЕДИНИЧНЫЙ ИМПУЛЬС .....                                                      | 16 |
| 2.6 ГАРМОНИЧЕСКИЙ ВХОДНОЙ СИГНАЛ .....                                           | 17 |
| 2.7 ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИЯ .....                                                     | 17 |
| ЛЕКЦИЯ 3 .....                                                                   | 19 |
| ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ .....                              | 19 |
| 3.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕНЬЕВ .....                                 | 19 |
| 3.2 ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕНЬЕВ САУ .....                                   | 20 |
| 3.3 УСИЛИТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО .....                                                     | 20 |
| 3.4 ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО .....                                                 | 20 |
| 3.5 ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО .....                                                    | 21 |
| 3.6 АПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЗВЕНО .....                                                   | 21 |
| 3.7 КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО .....                                                    | 22 |
| 3.8 ЗАПАЗДЫВАНИЕ В САУ .....                                                     | 25 |
| 3.9 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ .....                                    | 26 |
| 3.10 ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ .....                                       | 26 |
| 3.11 ВСТРЕЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ .....                              | 27 |
| 3.12 ПОНЯТИЕ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ САУ .....                                           | 27 |
| 3.13 АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ<br>.....               | 30 |
| ЛЕКЦИЯ 4. ....                                                                   | 33 |
| СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ .....                                  | 33 |
| 4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНТЕЗЕ САУ .....                                           | 33 |
| 4.2 ТИПОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....                     | 34 |
| 4.3 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА .....                                              | 36 |
| 4.4 ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИУ .....                                                      | 36 |
| 4.5 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИУ .....                                                      | 37 |
| 4.6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИУ .....                                                    | 38 |
| 4.7 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНЫЕ ИУ .....                                                 | 39 |
| 4.8 РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ (РО) .....                                               | 40 |
| ЛЕКЦИЯ 5. ....                                                                   | 45 |
| ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.<br>.....             | 45 |
| 5.1 ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ .....                             | 45 |

|      |                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2  | ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА. ЕДИНИЦЫ И РАЗМЕРНОСТИ .....                                          | 46 |
| 5.3  | ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ .....                                                      | 46 |
|      | ЛЕКЦИЯ 6. ....                                                                            | 51 |
|      | ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ .....                                                               | 51 |
| 6.1  | МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ .....                                                        | 51 |
| 6.2  | КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ .....                                    | 51 |
| 6.3  | ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ .....                                                               | 51 |
| 6.4  | МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ .....                                                          | 52 |
| 6.5  | ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ .....                                                            | 52 |
| 6.6  | ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ .....                                                       | 54 |
| 6.7  | ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ .....                                                                 | 55 |
|      | ЛЕКЦИЯ 7. ....                                                                            | 57 |
|      | ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ,<br>ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ. .... | 57 |
| 7.1  | ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ВИДЫ ДАВЛЕНИЯ .....                                                   | 57 |
| 7.2  | КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ .....                                       | 57 |
| 7.3  | ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ .....                                                                | 58 |
| 7.4  | ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРЫ .....                                                            | 58 |
| 7.5  | ЕДИНИЦЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА КОЛИЧЕСТВА<br>ВЕЩЕСТВА .....                           | 59 |
| 7.6  | РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ (С<br>СУЖАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ) .....               | 60 |
| 7.7  | ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ .....                                                         | 61 |
| 7.8  | ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ (ИНДУКЦИОННЫЕ) РАСХОДОМЕРЫ .....                                         | 61 |
| 7.9  | НАПОРНЫЕ ТРУБКИ .....                                                                     | 62 |
| 7.10 | ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ, ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ .....                                              | 63 |
|      | Поплавковые уровнемеры .....                                                              | 63 |
|      | Гидростатические уровнемеры .....                                                         | 63 |
|      | Электрические уровнемеры .....                                                            | 64 |
|      | Весовые плотномеры .....                                                                  | 64 |
|      | Поплавковые плотномеры .....                                                              | 65 |
|      | Гидростатические плотномеры .....                                                         | 65 |
|      | Радиоизотопные плотномеры .....                                                           | 66 |
|      | Измерение вязкости жидкостей .....                                                        | 66 |
|      | Капиллярные вискозиметры .....                                                            | 67 |
|      | ЛЕКЦИЯ 8. ....                                                                            | 70 |
|      | ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЕ СРЕДСТВ .....                                                | 70 |
|      | АВТОМАТИЗАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМАХ .....                                              | 70 |
| 8.1  | ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....                                                                | 70 |
| 8.2  | ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ .....                                                  | 70 |
| 8.4  | РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ НА ФСА .....                                                          | 73 |
| 8.5  | ПРИМЕРЫ ФСА .....                                                                         | 74 |