

Федеральное агентство по образованию

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Санкт – Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

Кафедра ресурсосберегающих технологий

**В.Л. Рукин, У.Ю. Коробейникова**

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Учебное пособие  
для студентов заочной формы обучения по  
специальности «Рациональное использование материальных и  
энергетических ресурсов»

Санкт-Петербург  
2010

УДК 658.512.011.56

В.Л. Рукин, У.Ю. Коробейникова. Системы управления химико-технологическими процессами: учебное пособие / В.Л. Рукин, У.Ю. Коробейникова. – СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2010. – 136 с.

В учебном пособии кратко изложены сведения о принципах, методах и технических средствах систем управления химико-технологическими процессами. Приводятся структуры современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), и приемы выбора и использования систем аварийного контроля, сигнализации, блокировки и защиты.

Данное учебное пособие соответствует программе учебной дисциплины «Системы управления химико-технологическими процессами» и предназначено для студентов 4-го курса заочной формы обучения специальности 240803 «Рациональное использование материальных и энергетических ресурсов».

Учебное пособие также может быть полезно студентам дневной формы обучения и аспирантам

Табл. 13, рис. 80, библиогр. назв. 6

Рецензенты:

- 1 ООО «ПО Киришинефтеоргсинтез». Г.Д. Залищевский, техн. директор, д-р техн. наук
- 2 В.К. Викторов, д-р техн. наук, зав. кафедрой информационных систем в химической технологии СПбГТИ(ТУ)

Утверждено на заседании методической комиссии факультета органического синтеза и полимерных материалов 01.07.2010

Рекомендовано к изданию РИСо СПбГТИ(ТУ)

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ...	8
1.1 Автоматизированная система управления предприятием (АСУП).....	9
1.2 Автоматизированная система управления производством (АСУПр) ...	10
1.3 Локальные автоматические системы (ЛСУ) для автоматизации технологических процессов .....	11
1.4 Автоматизация управления технологическими процессами.....	12
2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ .....	16
2.1 Цель управления химико-технологическим процессом .....	16
2.2 Технологические объекты управления .....	16
2.2.1 Управление химико-технологическим процессом .....	18
2.2.2 Классификация ТОУ .....	19
2.3 Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП).....	22
2.3.1 Функции АСУТП .....	23
2.3.2 Классификация АСУТП .....	23
2.3.3 Компоненты АСУТП .....	26
3 ДИНАМИКА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	32
3.1 Динамическое звено.....	36
3.2 Представление АСР в частотной области .....	41
3.3 Основные типовые динамические звенья.....	44
3.4 Устойчивость и наблюдаемость систем автоматического управления.	51
3.5 Оценка качества регулирования АСР .....	56
3.5.1 Оценка запаса устойчивости и быстродействия по переходной характеристике .....	57
3.5.2 Корневые методы оценки качества .....	58
3.5.3 Интегральные оценки качества .....	60
4 ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА.....	62

4.1 Свойства объекта управления.....	62
4.2 Методы получения математического описания.....	65
4.2.1 Аналитические методы.....	66
4.2.2 Методы экспериментального определения динамических характеристик объектов управления.....	68
4.2.3 Определение динамических характеристик объекта управления по его кривой разгона.....	70
5 ТИПОВЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	73
5.1 Позиционный регулятор.....	73
5.2 Пропорциональный регулятор.....	75
5.3 Интегральный регулятор.....	76
5.4 Пропорционально-интегральный регулятор.....	77
5.5 Пропорционально -интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.....	78
5.6 Выбор типа регулятора.....	79
6 СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ.....	81
6.1 Государственная система приборов.....	81
6.2 Измерения технологических параметров.....	82
6.3 Классификация контрольно-измерительных приборов.....	83
7 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	87
7.1 Условные обозначения.....	87
7.2 Основные принципы построения функциональных схем автоматизации (ФСА).....	91
8 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	93
8.1 Типовые САР с гидродинамическими объектами.....	93
8.2 Автоматизация тепловых процессов.....	96
8.3 Автоматизация массообменных процессов.....	101
9 ПОЯСНЕНИЯ К ГОСТ 21.404-85 ПО РАЗРАБОТКЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	107
9.1 Основные положения разработки схемы автоматизации (СА).....	107
9.2 Оформление чертежей ФСА.....	110

9.2.1 Правила изображения технологического оборудования и коммуникаций на технологических схемах .....	110
9.2.2 Правила изображения технических средств автоматизации .....	111
9.2.3. Методика оформления и графического выполнения ФСА .....	118
9.2.4. Методика заполнения заказной спецификации на приборы и средства автоматизации .....	119
<b>10 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ .....</b>	<b>122</b>
<b>11 КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ.....</b>	<b>123</b>
11.1 Контрольная работа № 1 .....	123
11.2 Контрольная работа № 2 .....	125
11.3 Контрольная работа № 3 .....	126
Литература .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности комплексной механизации и автоматизации, внедрению разнообразных систем управления уделяется большое внимание. Это объясняется сложностью и высокой скоростью протекания химико-технологических процессов, их разнообразием, высокой чувствительностью их к нарушению режима, вредностью условий работы, взрыво- и пожароопасностью перерабатываемых веществ и т. д.

По мере осуществления механизации производства сокращается тяжелый физический труд, но человек продолжает принимать непосредственное участие в технологическом процессе, при этом на него возлагаются функции управления механизмами и машинами.

С увеличением нагрузок аппаратов, мощностей машин, сложности и масштабов производства, с повышением давлений, температур, скоростей химических реакций ручной труд практически подчас просто невыносим. Например, в производстве полиэтилена давление достигает 300 МПа, в производстве карбида кальция температура в электрических печах равна 3000°C, процесс обжига серного колчедана в кипящем слое продолжается несколько секунд. В таких условиях даже опытный рабочий часто не в состоянии своевременно воздействовать на процесс в случае отклонения его от нормы, а это может привести к авариям, пожарам, взрывам.

Ограниченные возможности человеческого организма (утомляемость, недостаточная скорость реакции на изменение окружающей обстановки и на большое количество поступающей информации, субъективность в оценке сложившейся ситуации) являются препятствием для дальнейшей интенсификации производства.

Наступает новый этап машинного производства - **автоматизация производства**. Этот этап характеризуется освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам.

Автоматизация приводит к улучшению основных показателей эффективности производства: **увеличению количества, улучшению качества, снижению себестоимости продукции, повышению производительности труда**.

Проведение некоторых современных технологических процессов возможно только при условии их полной автоматизации (например, процессы, осуществляемые на атомных установках, процессы дегидрирования и др.). При ручном управлении такими процессами малейшее замешательство человека и несвоевременное воздействие его на

процесс могут привести к серьезным последствиям.

Автоматизация **способствует** безаварийной работе оборудования, **исключает** случаи травматизма, **предупреждает** загрязнение окружающей среды промышленными отходами.

При выборе объекта автоматизации определяющими являются экономические факторы. И лишь в тех случаях, когда автоматизация вводится для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, экономическая эффективность автоматизации уходит на второй план.

## **1 ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

Для обеспечения эффективности работы промышленного производственного предприятия повсеместно используется иерархический принцип управления этим предприятием.

Заключается он в реализации многоступенчатой организации процесса управления.

Каждая ступень управления имеет свои объекты и цели управления.

Обычно целью управления является обеспечение заданных при создании и развитии предприятия технико-экономических показателей. Технологический режим, при котором достигаются заданные показатели, называется оптимальным. Технологический режим изменяется под действием реальных производственных возмущений и поэтому может существенно отклоняться от оптимального.

Чаще всего управление технологическим процессом организуется в виде двух ступеней. На верхней ступени цель управления заключается в отыскании оптимального режима работы. Объектом управления при этом является все производственное оборудование и все проходящие в нем технологические процессы вместе с оборудованием.

Тогда цель управления на нижней ступени - это обеспечение минимальных отклонений технологических параметров от их оптимальных значений. Эта цель достигается относительно легко и заключается в стабилизации технологических параметров.

При управлении всем предприятием возникают такие цели и задачи, которые нельзя отнести к отдельным технологическим процессам. Это задачи оперативного управления цехами, организации производства, планирование запасов, сырья, готовой продукции и т.д. Поэтому процесс управления предприятием должен включать еще один уровень, где решаются указанные задачи (высший уровень иерархии).

Когда производственная структура предприятия включает в себя несколько производств применяется трехуровневая иерархия управления, представленная на рисунке 1.



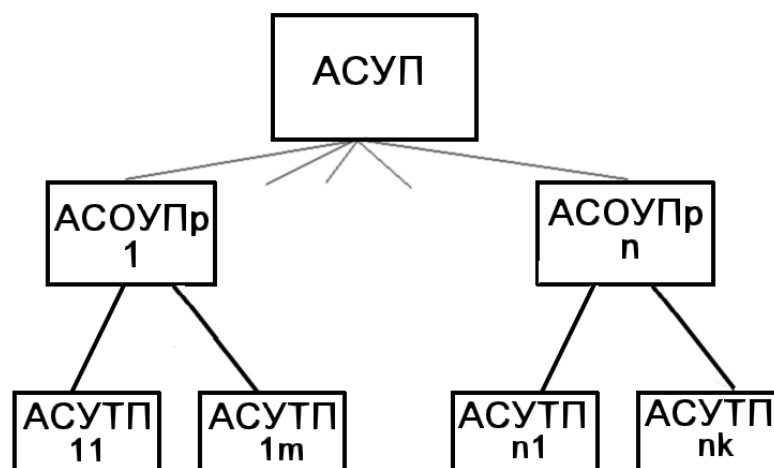


Рисунок 1 - Трехуровневая иерархии управления

### 1.1 Автоматизированная система управления предприятием (АСУП)

АСУП – человеко-машинная система, объединяющая административно-управленческий персонал предприятия, вычислительную и организационную технику.

Объектом управления здесь является все предприятие:

- > технологические производства вместе с оборудованием и АСУ предыдущих уровней;
- > вспомогательные службы (снабжение, сбыт, ремонтные, конструкторские и т.п.), обеспечивающие основное производство;
- > транспортное хозяйство;
- > цеха контрольно-измерительных приборов, энергоснабжение, теплоснабжение;
- > центральные заводские лаборатории.

Все вместе - это единая производственная система, которая имеет входы и выходы, как объект управления. Входы - сырье, материалы, энергетические ресурсы. Выходы - конечный продукт.

Особенности предприятия, как объекта управления:

- > число задач управления может составлять до нескольких сотен;
- > предприятие все время подвергается внутренним и внешним возмущениям (внутренние возмущения - поломка оборудования или изменение его характеристик, несвоевременная поставка полуфабрикатов, производственные травмы; внешние возмущения - нарушение взаимосвязи с поставщиками сырья и материалов, несвоевременное обеспечение транспортом, нестабильность характеристик сырья внутри одной партии,

стихийные бедствия).

Цель деятельности предприятия - максимальный выпуск товарной продукции, требуемого качества при минимальных затратах на ее производство. Для этого осуществляется сбор, передача и обработка производственно-экономической и социальной информации с целью подготовки и принятия управленческих решений.

Задачи, решаемые на данном уровне - планирование производства отдельных цехов и участков, управление транспортом, складами, энергоресурсами, а также показателями оперативного управления системами среднего уровня. В управлении принимает участие административно-управленческий персонал, таким образом, данная система относится к автоматизированным системам. В административно-управленческий персонал входят: руководитель предприятия, ИТР, служащие, заводо- и цехоуправление.

## **1.2 Автоматизированная система управления производством (АСУПр)**

АСУПр - средний уровень. Объектом управления на этом уровне являются совокупности технологических процессов вместе с технологическим оборудованием и АСУТП.

Целью управления на данном уровне иерархии является согласование работы отдельных агрегатов между собой с учетом внешних (переход с марки на марку, изменение расходов входных и выходных потоков, подача электроэнергии, оборотной воды, пневмотранспорт и т.п.) и внутренних (поломка оборудования, выход из строя средств автоматизации, изменение расхода готовой продукции) для производства возмущений.

Задачи, решаемые на этом уровне:

- > контроль и управление статическими режимами технологических процессов и производств (сбор и обработка информации о технологическом процессе, определение оптимальных режимов);
- > оперативное управление (расчет оптимального распределения материальных потоков между цехами и агрегатами, устранение нештатных ситуаций, передача команд на нижний уровень);
- > технико-экономическое планирование производства (определение плановых показателей на продолжительном отрезке времени).

Указанные функции управления относительно сложны и не могут быть целиком возложены на автоматические устройства. Поэтому на данном уровне в управлении участвует оператор и система снова подпадает под

определение автоматизированных систем.

учтено влияние концевых групп полимера, которым при достаточно больших молекулярных массах можно пренебречь.

### **1.3 Локальные автоматические системы (ЛСУ) для автоматизации технологических процессов**

Локальные автоматические системы создаются на промышленных объектах для сбора, преобразования и хранения информации, для обнаружения выхода технологических параметров из регламентных диапазонов (информационные функции). Но основной целью локальных систем является реализация автоматических регулирующих воздействий, осуществление автоматической блокировки, защиты и обеспечение реализации (если требуется) ручного воздействия. Конечно – это важнейшая управляющая функция систем нижней ступени автоматизации. Они характеризуются показателем эффективности ведения процесса. Цель управления процессом формулируется как обеспечение показателя эффективности на заданном (желательно - оптимальном) уровне.

ЛСА состоят из нескольких подсистем.

Подсистема контроля параметров обеспечивает контроль и обнаружение отклонений технологических параметров. Контролируемые параметры должны представлять наиболее полную информацию о процессе, необходимую для обеспечения пуска, наладки системы, а также оперативного управления ею.

Контролю подлежат:

- регулируемые выходные параметры;
- стабилизируемые возмущения входных потоков;
- контролируемые возмущения;
- параметры, необходимые для расчета технико-экономических показателей.

Подсистема регулирования параметров выполняет формирование и реализацию управляющих воздействий. Эти воздействия на ТОУ должны обеспечивать проведение процесса в установившемся режиме с заданным значением показателя эффективности. Регулированию подлежат:

- показатель эффективности процесса или параметр косвенно его характеризующий;
- выходные параметры, свидетельствующие о нарушении материального и теплового баланса в процессе;

- стабилизируемые возмущающие воздействия.

Подсистема сигнализации (особенно для химико-технологических объектов) разрабатывается на основании анализа объекта в отношении его взрыво- и пожароопасности, токсичности и агрессивности перерабатываемых веществ. Система сигнализации должна своевременно оповещать обслуживающий персонал о нарушении технологического регламента, который может привести к браку или аварии.

Сигнализации подлежат:

- отклонения наиболее важных режимных параметров и показателя эффективности от регламентных значений;
- параметры, изменение которых ведет к браку или аварии, прекращению подачи материальных и тепловых потоков;
- параметры, указывающие на отключение оборудования, не предусмотренные технологическим регламентом.

Подсистема защиты предназначена для формирования и реализации воздействий защиты и блокировки. Она предназначена для реализации мероприятий, предотвращающих аварии по сигналам, свидетельствующим о возникновении предаварийной ситуации и работает автономно.

#### **1.4 Автоматизация управления технологическими процессами**

Активное развитие работ по автоматизации технологических процессов в нашей стране началось в 50-е-60-е годы. В 60-е годы основное внимание было уделено созданию **локальных систем**, обеспечивающих автоматизацию простейших функций управления технологическими процессами: **централизованный контроль, противоаварийную защиту, регулирование основных технологических параметров.**

Развитие химической технологии, интенсификация технологических процессов, проведение их в режимах, близких к критическим, применение агрегатов большой единичной мощности потребовало создания гораздо более современных систем управления, чем локальные системы автоматизации. Эти принципиально новые системы получили название **автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).**

Создание АСУТП стало возможным благодаря использованию ЭВМ (второго поколения) для управления технологическими процессами в "реальном" времени, т.е. в едином темпе с развитием управляемого процесса. (Первые системы появились в 60-х годах: системы КАСКАД,

АВТОДИСПЕТЧЕР для управления аммиачным производством). В настоящее время АСУТП находят широкое применение.

АСУТП отличаются от локальных систем управления следующим:

1. более совершенной организацией потоков информации,
2. практически полной автоматизацией получения, обработки и представления информации,
3. возможностью активного диалога оперативного персонала с ЭВМ в процессе управления,
4. более высокой степенью автоматизации функций управления, включая пуск и остановку производства.

От систем управления автоматическими производствами типа цехов и заводов-автоматов (**являющихся высшей степенью автоматизации**) АСУТП отличается значительной степенью участия человека в процессе управления. По мере развития АСУТП и технического совершенствования технологических объектов эти различия уменьшаются.

В современных производствах задача управления технологическим процессом осуществляется **автоматизированной системой управления технологическим процессом** (АСУ ТП). АСУ ТП – это комплекс, объединяющий технологический процесс, технические средства сбора, обработки, преобразования информации, программного, алгоритмического и математического обеспечения и оперативного персонала.

Функциональная структура АСУ ТП представляет собой многоуровневую иерархическую структуру (рис. 2).

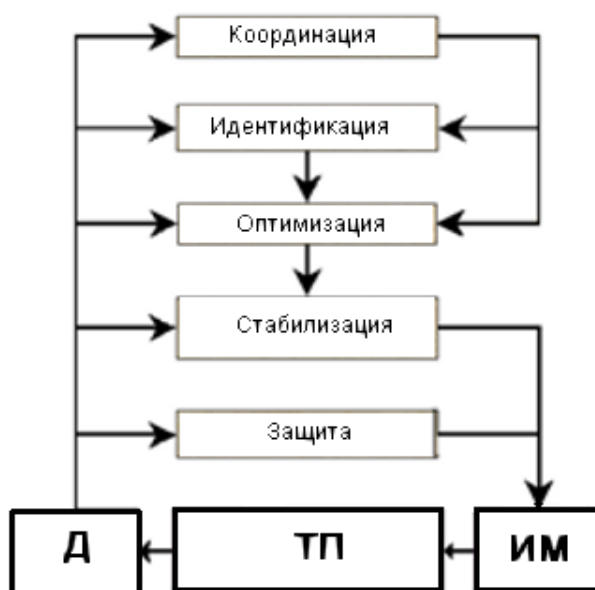


Рисунок 2 - Функциональная структура АСУТП

Нижний уровень представляет технологический процесс и технические средства получения информации (Д) и реализации управляющих воздействий

(ИМ).

“**Защита**” – подсистема комплексных средств автоматической защиты и блокировок.

“**Стабилизация**” – подсистема выработки управляющих сигналов и средств автоматического регулирования технологических параметров.

“**Оптимизация**” – подсистема расчета оптимальных параметров технологического процесса в соответствии с принятыми критерием и целями функционирования технологического процесса.

“**Идентификация**” – подсистема расчета параметров математических моделей технологического процесса.

“**Координация**” – подсистема расчета технико-экономических показателей (ТЭП), ввода в систему директив и указаний руководства предприятия и передача информации в другие системы управления предприятием для общей координации управления предприятием.

АСУ ТП – это человеко-машинная система. Функции системы могут быть реализованы в двух режимах ее работы:

**автоматизированном**, в котором осуществляется автоматический сбор и обработка информации и выработка рекомендаций по управлению, а реализация управляющих воздействий осуществляется оператором;

**автоматическом**, в котором выработка и реализация управляющих воздействий осуществляется автоматически управляющими устройствами без участия оператора.

Структурная схема взаимодействия оператора и системы управления представлена на рисунке 3.

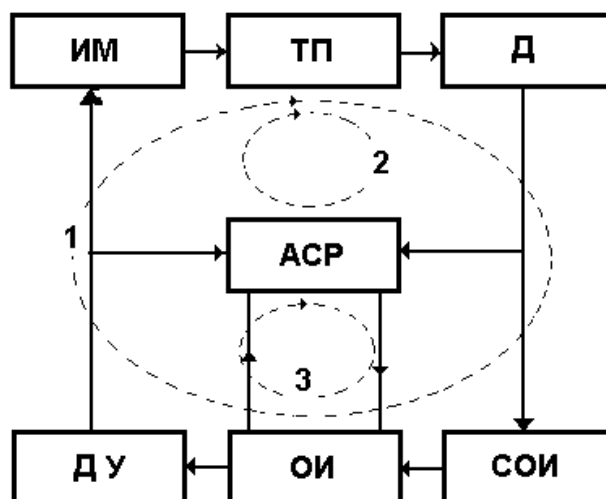


Рисунок 3 - Структурная схема взаимодействия оператора и системы управления

Здесь:

АСР – автоматическая система регулирования, СОИ – система

отображения информации, ДУ – органы дистанционного управления.

В системе несколько контуров управления:

**1 контур** – автоматизированный;

**2 контур** – автоматический;

**3 контур** – система, в которой задание изменяет оператор, а управляет технологическим процессом АСР.

Таким образом, в системах управления происходит переработка информации о состоянии объекта управления, выработка управляющих воздействий и передача ее в виде сигналов от объекта в управляющую систему и от управляющей системы к объекту управления.

## 2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### 2.1 Цель управления химико-технологическим процессом

Химико-технологическая система (ХТС) функционирует нормально, если ее режимные параметры (температура, давление, расход, состав и т.п.) не отклоняются существенным образом от расчетных значений. Для обеспечения нормального функционирования технологической системы ею надо управлять.

**Управление** – процесс, обеспечивающий необходимое, в соответствии с целевым назначением, протекание химико-технологического процесса (ХТП) путем изменения материальных и энергетических потоков. Технологический процесс, с точки зрения управления, называется объектом управления.

**Система управления** – это система, объединяющая объект управления и, собственно, управляющую систему.

Управляющая система осуществляет сбор информации о состоянии объекта управления, возмущающих воздействий и состояния внешней среды (рис. 4).

На основе полученной информации принимаются решения по управлению и вырабатываются управляющие воздействия.



Рисунок 4 – Система управления

### 2.2 Технологические объекты управления

Управляемый технологический процесс вместе с оборудованием, в котором он осуществляется, называется **технологическим объектом управления (ТОУ)**.

К ТОУ относятся как отдельные технологические агрегаты и установки, реализующие локальный технологический процесс, так и целые производства (цехи, участки) промышленного предприятия. Существуют



супер-ТОУ (например, установка ЛК-6У на нефтеперерабатывающем заводе), включающие сотни технологических аппаратов.

ТОУ должен удовлетворять следующим требованиям:

1. оборудование ТОУ должно быть полностью механизировано и безотказно работать в установленный межремонтный период,

2. желательно, чтобы реализуемый процесс был непрерывным,

3. технологическая схема ТОУ должна быть составлена таким образом, чтобы он был управляемым т.е.:

а. разбит на определенные зоны с возможностью воздействия на технологический режим в каждой из них изменением материальных или энергетических потоков,

б. чтобы была возможность воздействия на характеристики оборудования,

в. чтобы был обеспечен доступ человека к местам установки датчиков, регулирующих органов,

г. чтобы число возмущающих воздействий, поступающих в основные аппараты схемы, технологический режим в которых обуславливает количество и качество выпускаемых целевых продуктов, было сведено к минимуму. Последнее достигается установкой промежуточных аппаратов-ресиверов, емкостей с мешалками, теплообменников, уменьшающих амплитуду и частоту изменения таких параметров как давление, состав, температуру.

Сложность управления ТОУ заключается в том, что они постоянно подвергаются **возмущающим воздействиям**, нарушающих технологический режим.

Возмущения условно можно разбить на два вида:

а. **Внешние** - проникающие в ТОУ извне при изменении всех входных и некоторых выходных параметров, а также параметров окружающей среды. Так изменение давления греющего пара нарушает теплообмен в нагревателе, а значит и температуру продукта на его выходе; изменение расхода кубового остатка повлияет на уровень в ректификационной колонне.

б. **Внутренние** - возникающие в самом ТОУ при изменении характеристик технологического оборудования (изменение активности катализатора, отключение отдельных аппаратов, коррозия внутренних поверхностей аппаратов).

Технологический процесс как объект управления характеризуется входными и выходными переменными (рис. 5).

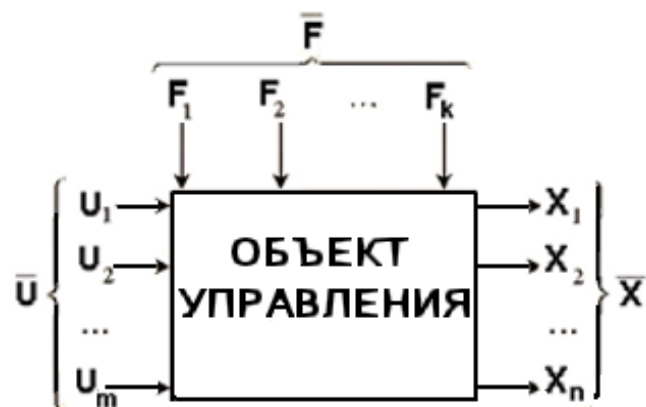


Рисунок 5 - Группы переменных, входящих в описание объекта управления

$U$ – вектор входных переменных, характеризует состояние процесса и называют управляемыми (регулируемыми) параметрами. Это такие параметры, как температура, давление, состав, концентрация, расход и т.п.

$X$ – вектор входных переменных, называемых управляющими (регулирующими) воздействиями. К ним относятся параметры, с помощью которых можно изменять материальные и энергетические потоки, в основном расход, давление, температура и т.п.

$F$ – вектор входных переменных, называемых возмущающими воздействиями, являющихся внешними воздействиями по отношению к объекту. Это параметры, связанные с изменением режимов работы процесса и внешней среды такие, как изменение расходов, температур, давлений, состава сырья и т.п.

Переменные процесса связаны между собой функциональными зависимостями, и рассматриваются их изменения во времени.

Соответственно, должна быть решена задача анализа системы, определено состояние объекта как функция регулирования, возмущающих параметров и времени

$$X=G(U,F,t)$$

### 2.2.1 Управление химико-технологическим процессом

Давая определение автоматизированному производству, мы говорим, что оно характеризуется передачей функций управления от человека автоматическим устройствам. Что же это за функции? Из чего складывается процесс управления?

Процесс управления складывается из следующих операций, которые можно объединить в три группы:

1. получение и обработка информации о состоянии управляемого технологического процесса,
2. анализ полученной информации и принятие решения о целесообразном воздействии на процесс,
3. осуществление принятого решения, т.е. непосредственное воздействие на процесс путем изменения материальных или энергетических потоков.

### 2.2.2 Классификация ТОУ

С точки зрения автоматизации и управления ТОУ можно разделить по:

1. типу технологического процесса,
2. характеру технологического процесса,
3. сложности технологического процесса,
4. характеру параметров, участвующих в управлении.

**По типу процессов**, протекающих в ТОУ различают следующие классы ТОУ:

- **гидромеханические** (в них производится перемещение жидкостей или газов, перемешивание, разделение неоднородных сред),
- **тепловые** (в них осуществляется нагревание, охлаждение, выпаривание, кристаллизация),
- **массообменные** (в них идут процессы ректификации, абсорбции, адсорбции, сушки, экстракции),
- **механические** (в них производится измельчение, дозирование, перемещение твердых материалов),
- **химические** (в них осуществляются окисление, восстановление, синтез, нейтрализация, нитрование и т.д.)

Технологические процессы одного типа могут отличаться аппаратным оформлением, свойствами перерабатываемых веществ, однако все они протекают по одним и тем же законам и характеризуются аналогичными зависимостями между параметрами. Это дает возможность разработать типовое решение по их автоматизации.

**По характеру технологического процесса** ТОУ делятся на ТОУ с непрерывным характером производства и с периодическим (дискретным).

В первом случае технологический режим после пуска ТОУ устанавливается неизменным на длительные сроки (недели, месяцы), во втором - длительность технологических операций незначительна (минуты, часы). Автоматизация периодических процессов существенно осложнена

необходимостью перестройки работы аппаратов, заключающейся в изменении технологических режимов, а также маршрутов материальных и энергетических потоков.

**Степень сложности ТОО** характеризуется информационной емкостью объекта, т.е. числом технологических параметров, участвующих в управлении (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость степени сложности от числа технологических параметров

<b>Степень сложности</b>	<b>Число параметров</b>	<b>Пример ТОО</b>
минимальная	<b>10-50</b>	насосная
малая	<b>50-150</b>	массообменная колонна
средняя	<b>150-600</b>	установка первичной переработки нефти
повышенная	<b>600-2500</b>	производство этилена
высокая	<b>&gt;2500</b>	установки глубокой переработки нефти

**По характеру параметров управления ТОО** делятся на объекты с сосредоточенными и распределенными параметрами. В первом случае параметр имеет одно числовое значение в разных точках в данный момент времени, во втором - значение параметра неодинаковы в разных точках.

Основные химические производства и составляющие их технологические процессы рассматриваются в этом курсе **как объекты управления.**

Протекание ТП характеризуется совокупностью физических величин – показателей процесса (технологическими параметрами). В химической технологии такими параметрами являются расход материальных и энергетических потоков, химический состав, температура, давление, уровень вещества.

Совокупность технологических параметров, полностью характеризующих данный ТП, называется технологическим режимом.

Выполнение требований, предъявляемых к ТП (получение продукта заданного качества и в заданном количестве с минимальным расходом сырья и энергии), возможно лишь при целенаправленном воздействии на его технологический режим.

Совокупность операций, необходимых для пуска, остановки процесса, а также для поддержания или изменения в требуемом направлении величин,

характеризующих процесс, называется управлением. Частным случаем управления является регулирование-операция управления, которая относится к поддержанию или изменению показателей процесса.

Например, необходимо заполнить бак водой до заданного уровня с получением воды заданной температуры, изменяя расход горячей и холодной воды.

**Вариант 1.** Задание достигается чередованием шагов: сначала наполнить бак до половины холодной водой, затем добавить горячей до получения заданной температур, затем опять добавить холодной и т.д. Таким образом, осуществляется чередование работы систем регулирования.

**Вариант 2.** Операции выполняются параллельно: одновременно включаются и горячая и холодная вода, и регулируется изменение температуры путем изменения подачи горячей воды и уровня - посредством воздействия на подачу холодной воды. Таким образом, осуществляется процесс управления с координацией работы нескольких систем регулирования параллельно.

В основном непосредственно с процессом связано регулирование, а управление появляется уже на более высокой иерархии управления предприятием.

ТП вместе с технологическим оборудованием (промышленной установкой, в которой регулируются технологические параметры) называется объектом управления.

Технологические параметры, подлежащие в ходе ТП регулированию, называются регулируемыми параметрами.

Наиболее часто встречающийся вариант регулирования - поддержание регулируемого параметра на заданном значении. Устройство, которое сравнивает текущее значение регулируемой величины с требуемым значением и в случае появления сигнала рассогласования между ними вырабатывает сигнал, который по определенному закону воздействует на ТП называется регулятором.

Чтобы можно было осуществить регулирование, объект должен иметь регулирующий орган (например, регулирующий клапан) изменяя положение или состояние которого, можно изменить показатели процесса. Технологические параметры, изменяемые посредством регулирующих органов, называются регулирующими параметрами.

Объект регулирования (управления) и устройства, необходимые для осуществления процесса управления, называются системой регулирования (управления).

Операции управления могут осуществляться:

1. непосредственно человеком - ручное управление (ручные вентили);
2. из операторского помещения - дистанционное управление (пульт управления);
3. автоматическими регуляторами - автоматическое управление.

Различают автоматическую и автоматизированную систему управления.

> Автоматизированная СУ - разновидность СУ, включающая в себя технические средства, которые обеспечивают сбор, обработку и вывод информации о процессе, а также частичное принятие решений по управлению процессом и их реализацию. Человек (оператор) в такой системе выполняет функцию управления и обслуживания. Используют такую систему, если часть первичной информации не может быть получена и введена в систему автоматически, если автоматическое управление с помощью технических средств невозможно и если автоматическое управление требует неоправданно больших затрат.

> Автоматическая СУ - разновидность СУ, включающая средства, которые обеспечивают автоматический сбор и обработку информации, принятие решений и реализацию принятого решения по управлению процессом. Человек в таких системах выполняет функцию контроля и обслуживания систем. Используют такую систему при управлении непрерывными технологическими процессами. Такие системы называются автоматическими системами регулирования (АСР).

### **2.3 Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП)**

Цель управления АСУТП - выработка и реализация управленческих решений на технологический объект управления (ТОУ).

Непосредственно с технологическим процессом связаны локальные системы регулирования, функции которых сводятся к стабилизации отдельных технологических параметров. Этот уровень оснащен автоматическими системами регулирования, имеющими периферийные органы управления, через которые реализуются решения, принимаемые в процессе управления на более высоких иерархических уровнях.

Основные тенденции в развитии АСУТП.

1. Создание функционально замкнутых анализаторов качества, спектрометров и т.п.).
2. Типизация всех выходных сигналов датчиков.

3. Появление интеллектуальных терминалов, осуществляющих полную обработку сигнала, диагностику и др. функции.

4. Создание операторских станций на базе цветных графических дисплеев с клавиатурой взамен традиционных щитов управления.

Операторские станции осуществляют сбор и обработку информации, управление и связь с верхним уровнем через клавиатуру.

Изменениям подверглись все аппаратные средства, появились многоканальные микропроцессоры, контроллеры. На базе микропроцессоров формируются рабочие станции, т.е. в едином конструктиве персональный компьютер и устройства связи с ТООУ.

Использование средств искусственного интеллекта дает возможность выполнять диагностику не только комплекса технических средств (КТС), но и самого ТООУ. При этом оператору выдаются рекомендации к действиям в той или иной ситуации. Система диагностики сама сопоставляет текущую причину с возможными причинами ее породившими.

### **2.3.1 Функции АСУТП**

Из требований, предъявляемые к АСУТП особо надо отметить надежность, точность и быстродействие.

Функции, выполняемые АСУТП можно разделить на информационные, управляющие и вспомогательные.

Информационные функции: сбор, обработка, отображение для пользователей и хранение информации о состоянии КТС и ТООУ.

Управляющие функции: оперативное вычисление критериев качества, нахождение оптимальных управляющих воздействий, стабилизация технологических параметров, программное и логическое управление.

Вспомогательные функции: решение общесистемных задач, подготовка и выдача информации о состоянии ТООУ для верхнего уровня.

Основные задачи оптимизации управления – достижение оптимальных значений критериев управления, которые делятся на технологические (минимум или максимум значения какого-либо параметра) и экономические (максимум прибыли и производительности).

### **2.3.2 Классификация АСУТП**

*1 По режиму работы вычислительного комплекса (ВК) в АСУТП*

> АСУТП без вычислительного комплекса (ВК)

Для отдельных объектов АСУТП включает системы автоматического

регулирования (стабилизации, программного управления, ситуационного управления), системы сигнализации, блокировки и аварийной защиты. Такие системы имеют центральный пульт оператора на котором отображается вся необходимая для работы оператора информация на специальных приборах и эти системы позволяют осуществлять оператору постоянный контроль протекания техпроцесса.

> АСУТП с ВК в режиме сбора и обработки информации

В этом режиме вычислительный комплекс (ВК) служит для сбора информации с датчиков, предварительной обработки, представления данных оператору и архивирования информации (рис. 6).

> АСУТП с ВК в режиме советчика оператора

Схема - аналогична представленной на рисунке 6,

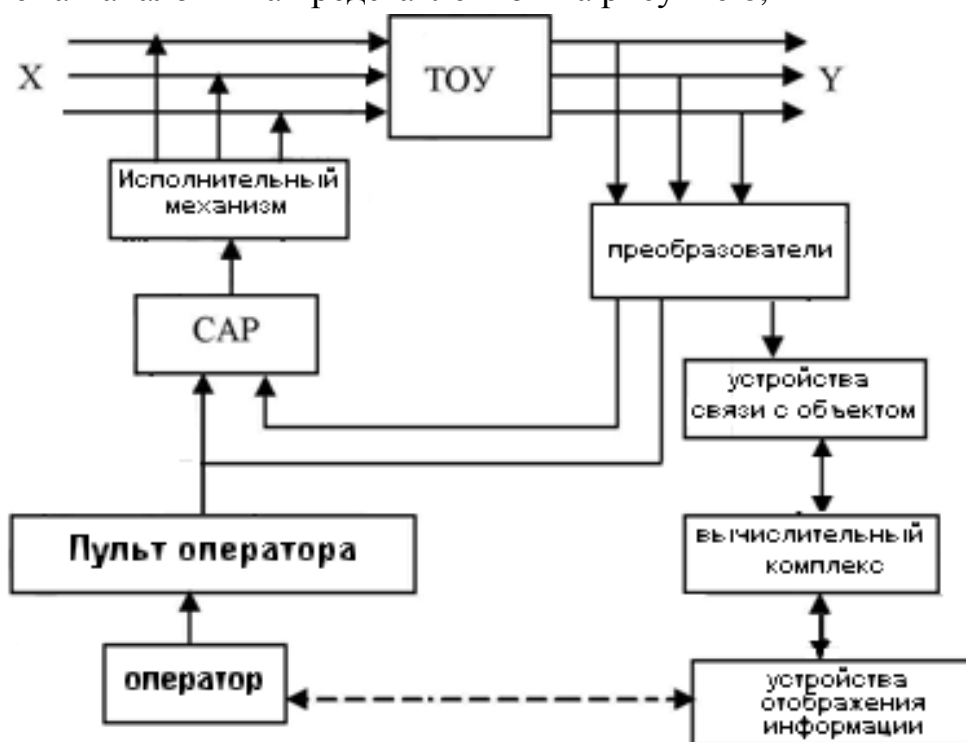


Рисунок 6 - Структурная схема АСУТП с ВК в режиме сбора и обработки информации

Отличия состоят в функциях выполняемых ВК. В ВК закладывается модель процесса и через определенные промежутки времени происходит сбор и обработка информации. Период квантования зависит от инерционных свойств объекта (5-15 минут). Эти данные сравниваются с данными модели и в соответствии с алгоритмами управления рассчитываются управляющие воздействия, которые выдаются оператору на дисплее. Окончательное решение принимает оператор.

> АСУТП с ВК, выполняющим функции центрального управляющего устройства (супервизорное управление)



В предыдущих рассматриваемых структурах предполагалось наличие аппаратных регуляторов. В режиме супервизорного управления задание регуляторам рассчитывает и задает ВК (рис. 7). Таким образом, получается, что контур управления замыкается через ВК. Оператор освобождается от функций управления, непрерывно наблюдает за процессом и может вносить коррективы.

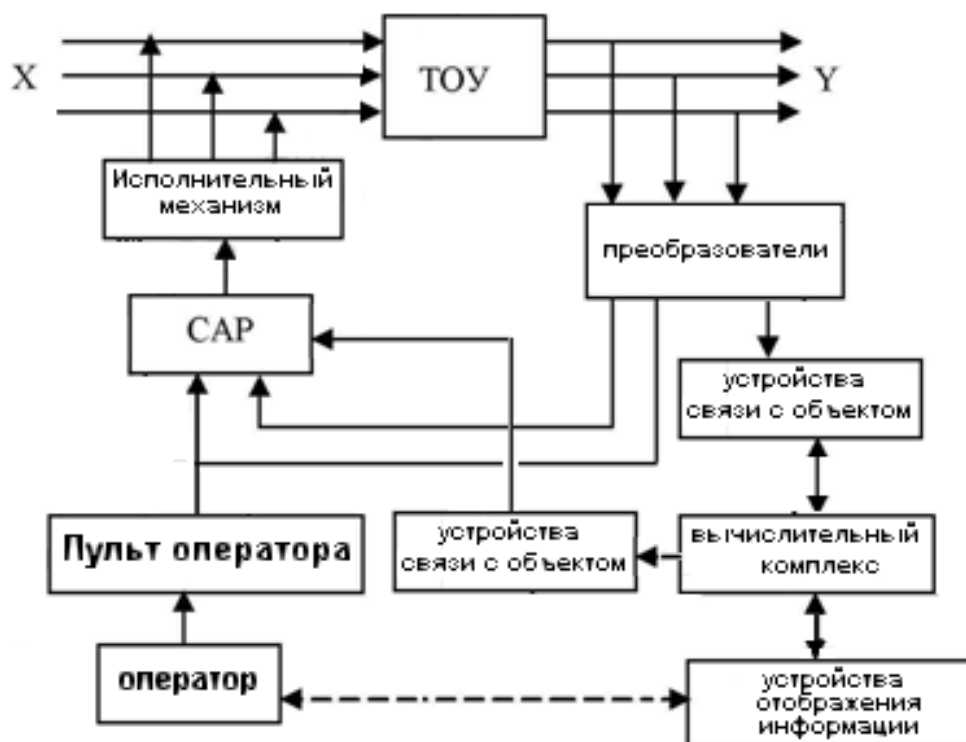


Рисунок 7 - Структурная схема АСУТП с ВК в режиме супервизорного управления

Достоинством такой структуры является то, что управление процессом происходит вблизи оптимальной точки, исключая субъективное воздействие на процесс.

> АСУТП с ВК в режиме непосредственного цифрового управления

Основное отличие этой структуры (рис.8) - это, то, что в системе отсутствуют аппаратные регуляторы, т.к. их функции возложены на ВК.

За счет чего могут быть значительно расширены алгоритмические возможности разрабатываемой системы управления, а именно помимо простых (типовых) регуляторов могут быть реализованы алгоритмы адаптивного управления, робастного управления и т.д., которые не реализуются аппаратными средствами автоматизации.

В этом режиме ВК рассчитывает не задание регулятору, а непосредственно вырабатывает управляющее воздействие.

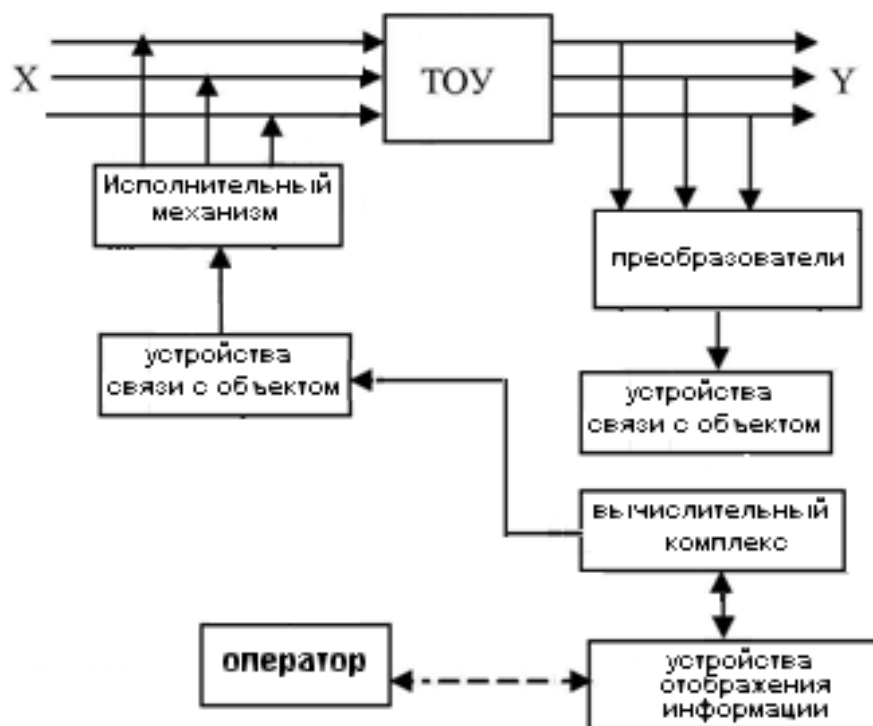


Рисунок 8 - Структурная схема АСУТП с ВК в режиме непосредственного цифрового управления

**2 По характеру управляемого процесса:**

- > АСУТП, управляющая непрерывным процессом;
- > АСУТП, управляющая дискретно-непрерывным процессом;
- > АСУТП, управляющая дискретным процессом.

**3 По информационной мощности:**

- > Малой мощности - системы, содержащие от 10 до 40 контролируемых переменных;
- > Пониженной мощности - от 41 до 160 переменных;
- > Средней мощности - от 161 до 650 переменных;
- > Повышенной мощности - от 6581 до 2500 переменных;
- > Большой мощности - от 2500 переменных.

**2.3.3 Компоненты АСУТП**

Компоненты АСУТП - это различного вида обеспечения, которые в совокупности составляют саму систему. Структура взаимосвязи всех видов обеспечения представлена на рисунке 9.

Оперативный персонал (слесари КИП, технологи, операторы, электрики) - обслуживает систему в режиме нормального функционирования.

Организационное обеспечение – совокупность документов,

определяющих порядок и правила функционирования оперативного персонала (технологическая инструкция и регламенты ведения процесса, инструкции по эксплуатации, описание АСУТП, правила поведения персонала, как в нормальном, так и в предаварийных ситуациях).



Рисунок 9 - Структура взаимосвязи всех видов обеспечения АСУТП

Информационное обеспечение – массивы данных входной и выходной информации (правила обмена информацией и классификация научно-технической информации, справочная и оперативная информация). Информационное обеспечение в целом должно обеспечивать полноту, непротиворечивость, отсутствие избыточности и дублирование информации.

Техническое обеспечение - комплекс технических средств (КТС) необходимых для функционирования АСУТП и техническая структура АСУТП.

В состав КТС входят:

- источники информации;
- преобразователи информации;
- средства локального регулирования;
- управляющий вычислительный комплекс;
- средства отображения информации;
- исполнительное устройство;
- средства передачи информации в другие АСУ.

С позиции технической структуры АСУТП может быть централизованной и распределенной.

Централизованная структура АСУТП у той системы, в которой вся информация поступает в единый центр, все технические средства за исключением источников информации и исполнительных устройств находится в операторском помещении. Достоинством такой АСУТП является удобство ее обслуживания, однако такую систему технически сложно реализовать для сложной АСУТП и ошибки центрального звена резко влияют на работу всей системы.

*Распределенная структура* присуща АСУТП, которая образуется объединением в единый комплекс ряда автономных локальных подсистем. Объединение производится сетью передачи данных и программным обеспечением. При этом происходит повышение надежности, благодаря резервированию подсистем через сеть, возникают сравнительно простые возможности развивать и модернизировать работающую систему. При этом, многие химико-технологические объекты управления позволяют модернизироваться.

Математическое обеспечение - совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задачи обработки информации и управления данным технологическим объектом. Реализуется в специальном программном обеспечении. Включают алгоритмы сбора, обработки и представления информации, алгоритмы управления и математические модели соответствующих ТОУ.

Метрологическое обеспечение – совокупность работ, проектных решений, технических и программных средств, направленных на обеспечение заданной точности измерения. Применяется на всех стадиях разработки и функционирования АСУТП. При разработке АСУТП

осуществляется выбор соответствующих технических средств и их резервирование для обеспечения единства измерений и точности; выполняется фильтрация измеренных датчиками данных и сбор достоверных знаний; а при эксплуатации проводится анализ состояния информационных измерительных средств и разрабатываются мероприятия по повышению уровня и совершенствованию средств измерения и контроля.

Программное обеспечение (ПО) - совокупность программ и программной документации, обеспечивающих реализацию функций АСУТП и функционирование вычислительных комплексов

ПО делится на общее и специальное.

*Общее ПО* поставляется со средствами вычислительной техники - это операционная система, система управления базами данных, служебные

программы, программы отладки, библиотеки стандартных программ и т.д. Общее ПО служит для организации функционирования всего КТС.

*Специальное ПО* - это совокупность специально разработанных программ, реализующих информационные и управляющие функции конкретной АСУТП и разрабатывается оно на базе языков высокого уровня.

Лингвистическое обеспечение - совокупность языковых средств для общения оператора с вычислительным комплексом, в частности для описания работы с данными.

Для разработки ЛСА необходимо разработать и составить совокупность обеспечений.

Разработка математического обеспечения ЛСА - это в основном синтез автоматических систем регулирования (АСР).

В ходе синтеза АСР последовательно рассматриваются структуры разомкнутой и замкнутой системы управления. Структура разомкнутой системы представлена на рисунке 10.

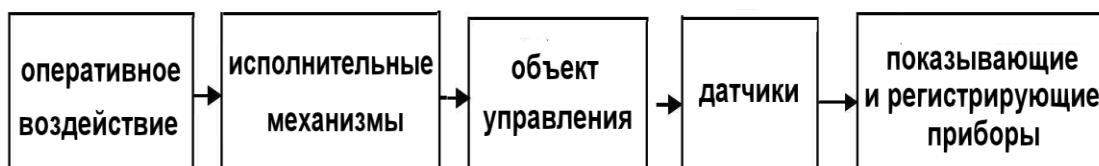


Рисунок 10 - Структура разомкнутой системы

Это простейшая система управления. Характерным для нее является то, что процесс работы системы не зависит непосредственно от результата ее воздействия на объект управления.

Протекание всех процессов в замкнутой системе коренным образом отличается от процессов в разомкнутой системе. В замкнутой системе имеется полная взаимосвязь работы всех устройств друг от друга (рис. 11).

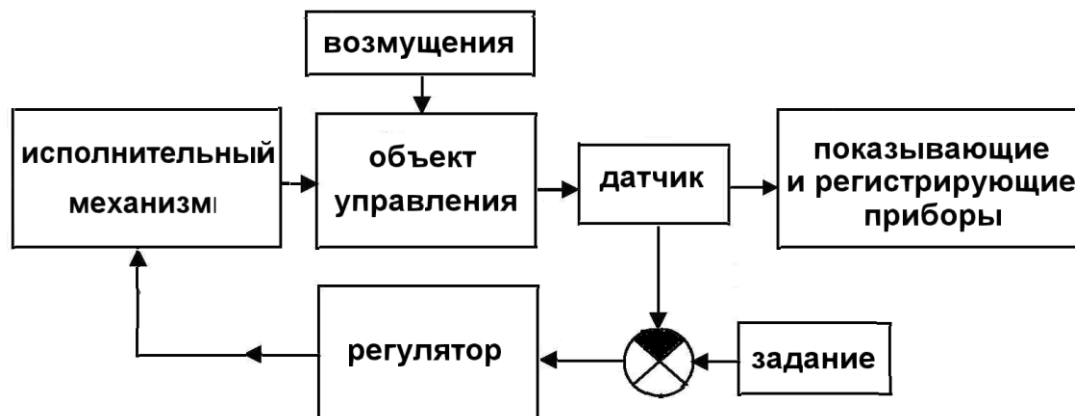


Рисунок 11 - Структура замкнутой АСР

Различные свойства замкнутых систем делают их незаменимыми в тех случаях, когда требуется точность и быстродействие для управления, измерения и для выполнения вычислений операций.

Для последующего синтеза АСР в структуре замкнутой системы выделяют математическое описание объекта управления (рис. 12).

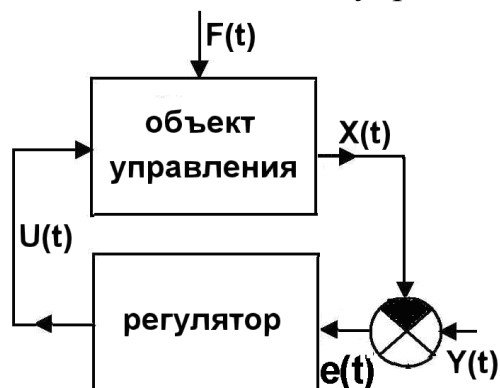


Рисунок 12 - Блок-схема замкнутой АСР:

$X(t)$  - регулируемый технологический параметр;

$U(t)$  - регулирующий технологический параметр;

$e(t)$  – ошибка регулирования,  $e(t) = Y(t) - X(t)$

$Y(t)$  - задающее воздействие, вводимое в систему и определяющее необходимый закон изменения регулируемой величины;

$F(t)$  - возмущающее воздействие, т.е. воздействие, которое нарушает заданный закон изменения регулируемой величины.

Возмущающее воздействие бывает внешним и внутренним.

Внешнее возмущающее воздействие проникает в объект извне вследствие изменения входных параметров (материальных и энергетических потоков на входе в объект), некоторых выходных (материальных и энергетических потоков на выходе объекта, состава продукта), а также параметров окружающей среды.

Внутреннее возмущающее воздействие возникает в самом объекте управления (например, при перераспределении насадок в колоннах насадочного типа или при загрязнении и коррозии внутренних поверхностей аппарата).

В зависимости от цели регулирования АСР делятся на 3 вида:

- Система автоматической стабилизации - система, предназначенная для автоматического поддержания с заданной точностью наперед заданного значения технологических параметров;
- Система программного автоматического регулирования - система, предназначенная для автоматического изменения с заданной

точностью какого-либо технологического параметра по предварительно заданному закону;

- Система следящего управления - система, предназначенная для автоматического воспроизведения с заданной точностью траектории изменения какого-либо технологического параметра, меняющегося по произвольному заранее неизвестному закону.

В качестве примера приведем классический пример, а именно систему автоматического управления самолетом (автопилот). Если с помощью автопилота надо поддерживать неизменный курс или надо разворачивать самолет по заданной программе, то данная система управления будет работать либо в режиме стабилизации постоянной величины, либо в режиме программного регулирования. Если же самолет надо наводить на какую-либо цель, причем заданное направление определяется визуализирующим цель устройством, например, радиолокационными, то данная система будет работать, как следящая система.

### 3 ДИНАМИКА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Свойства любой системы проявляются в процессе ее функционирования. Для построения системы регулирования (АСР) с необходимыми для ее эффективной эксплуатации свойствами требуется разработать ее структуру (какие устройства использовать и как их соединить друг с другом) и определить численные значения характеристик этих устройств. Эти разработки называются соответственно структурный и параметрический синтез АСР. При графическом отображении разрабатываемой структуры АСР она может отображаться в той степени подробностей, которая необходима для работы в каждом конкретном случае (рис. 13).

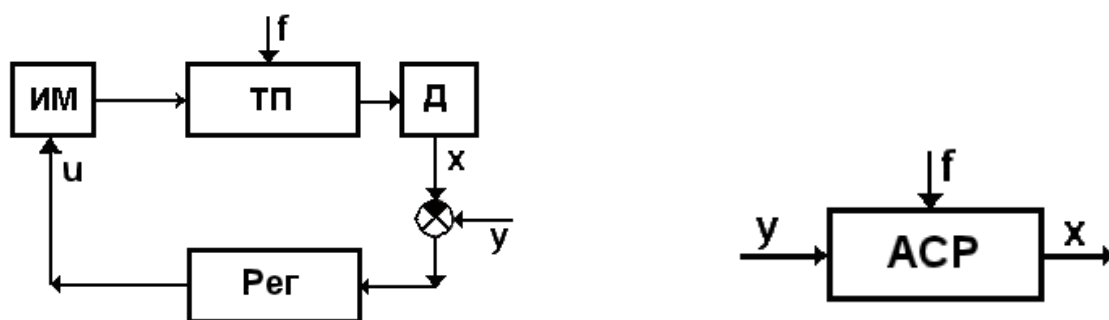


Рисунок 13 - Два варианта отображения одной АСР

На рисунке обозначено: ИМ - исполнительный механизм; ТП - технологический процесс, объект управления; Д - датчик; РЕГ - регулятор,  $\otimes$  - схема сравнения;  $x$  - регулируемые переменные,  $y$  - задаваемые значения переменных,  $f$  - внешние возмущения,  $u$  - регулирующие воздействия на объект.

Важно, что для любого варианта отображения на схеме и для большинства решаемых при синтезе АСР задач, каждая система состоит из так называемых звеньев, у которых есть входные и выходные переменные.

При воздействии внешней среды на входные переменные любой АСР в ней возникают различные процессы, которые проявляются в переходных процессах изменения выходных величин.

Рассмотрим возможную реакцию АСР на ступенчатое воздействие, подаваемое на один из ее входов. При этом выходной сигнал может меняться аperiodически или при наличии нескольких колебаний, которые затухают. Такой характер изменения выходной координаты системы характерен для устойчивых АСР (рис. 14).



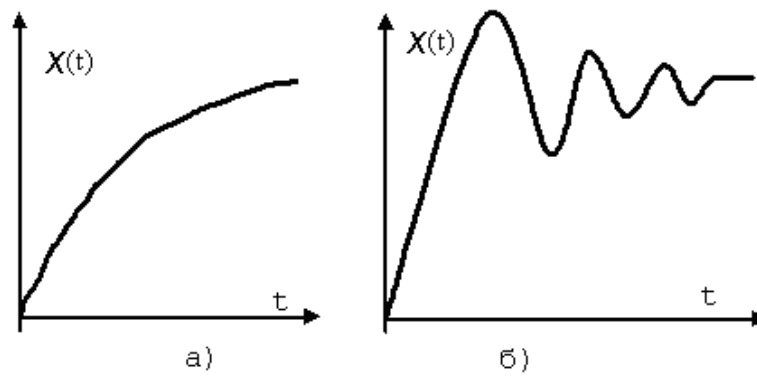


Рисунок 14 - Возможные переходные процессы для устойчивых АСР

Возможен случай, когда в системе возникают незатухающие колебания. АСР, обладающие таким свойством, называются консервативными (рис. 15).

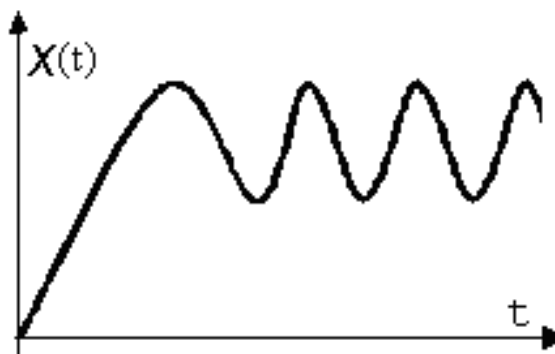


Рисунок 15 - Переходной процесс в консервативной АСР

В некоторых системах на выходе характерно отсутствие постоянного или периодического сигнала в течение всего периода ее работы. Такие системы называются *неустойчивыми* (рис. 16).

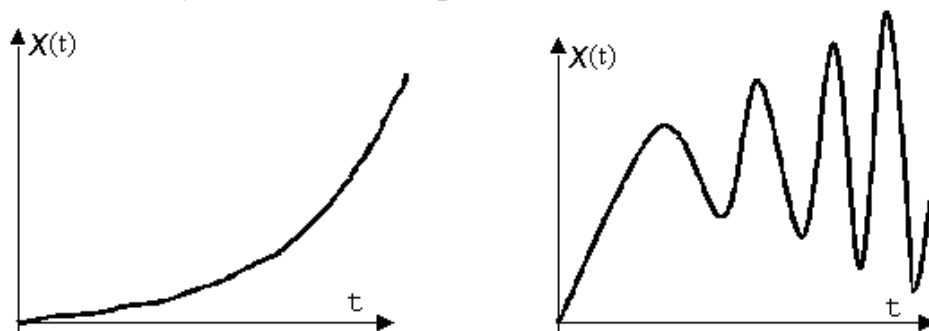


Рисунок 16 - Характер изменения выходной неустойчивой АСР

Каков характер переходного процесса и обеспечивается ли его устойчивость – вот основные вопросы, которые рассматриваются при создании каждой конкретной АСР. Определить вид конкретных переходных

процессов в создаваемой АСР можно, если знать математическое описание всех связей между всеми входными и выходными переменными величинами.

Как рассматриваемая система автоматического управления будет обрабатывать внешние воздействия, каков характер переходного процесса и обеспечивается ли его устойчивость – вот основные вопросы, которые рассматриваются при исследовании динамики систем автоматического управления.

Прямой путь решения этой задачи – это проведение натуральных экспериментов с реальными системами автоматического управления. Однако проведение таких экспериментов с реальной системой экономически невыгодно, а с проектируемой – невозможно.

Поэтому эксперименты для изучения свойств АСР проводят не с реальными системами, а их моделями. Математическое описание любого элементарного звена или всей сложной системы управления представляет из себя дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменений переменных.

Дифференциальное уравнение АСР или уравнение динамики ее движения – это уравнение, определяющее зависимость выходного сигнала  $x(t)$  от входной переменной  $u(t)$ . В общем виде оно может быть представлено как:

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx(t)}{dt} + a_n x(t) = b_0 \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{du(t)}{dt} + b_m u(t),$$

где  $a_0, \dots, a_n$  и  $b_0, \dots, b_m$  – некоторые коэффициенты, значения которых в общем случае не являются постоянными.

Решение этого уравнения определяет поведение системы автоматического управления в динамических режимах работы.

Вводя в рассмотрение алгебраический оператор дифференцирования вида  $p = \frac{d}{dt}$ , получаем запись дифференциального уравнения в операторной форме:

$$a_0 p^n x(t) + a_1 p^{n-1} x(t) + \dots + a_{n-1} p x(t) + a_n x(t) = b_0 p^m u(t) + \dots + b_{m-1} p u(t) + b_m u(t).$$

Полученное алгебраическое уравнение позволяет определить связь между входной и выходной переменной АСР как

$$x(t) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} u(t).$$

Это выражение не является абсолютно строгим, так как используется оператор  $p$ , выполняющий операцию дифференцирования.

Составление основных уравнений систем автоматического управления (АСР) может быть облегчено, если рассматривать ее как комбинацию динамических звеньев с определенными передаточными функциями.

Изображение АСР в виде совокупности динамических звеньев с указанием взаимосвязи между ними называется структурной схемой системы. Структурная схема может быть составлена на основе известных уравнений системы и, наоборот, дифференциальные уравнения могут быть получены из структурной схемы.

В дальнейшем для характеристики звена будет использоваться понятие передаточной функции, так как именно она дает связь между входной и выходной переменными того или иного звена в АСР или всей системы в целом. Функция, связывающая один входной и один выходной сигналы АСР. Является формой записи системы дифференциальных уравнений АСР решенной относительно требуемой выходной координаты.

Для дифференциальных уравнений с нулевыми начальными условиями целесообразно применение преобразования Лапласа, которое выполняется с помощью выражения вида

$$L\{X(t)\} = \int_0^{\infty} X(t) \cdot e^{-st} dt, \text{ где } s = \alpha + j\omega \text{ — комплексная переменная.}$$

Важным свойством преобразования Лапласа является замена операций интегрирования и дифференцирования делением и умножением на оператор Лапласа соответственно. То есть имеют место следующие соотношения:

$$L\left\{\frac{dX(t)}{dt}\right\} = s \cdot X(s)$$

$$L\left\{\int X(t) dt\right\} = \frac{X(s)}{s}$$

При переходе к преобразованию Лапласа рассматриваются не временные функции входной и выходной переменной, а их изображению по Лапласу. Применяя преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению, описывающему поведение звена в динамических режимах, получаем:

$$a_0 s^n x(s) + a_1 s^{n-1} x(s) + \dots + a_{n-1} s x(s) + a_n x(s) = b_0 s^m u(s) + \dots + b_{m-1} s u(s) + b_m u(s),$$

где  $s$  – оператор Лапласа.

Теперь можно математически строго записать связь между изображениями входной и выходной величин:

$$X(s) = \frac{b_0 s^m + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} U(s)$$

**Передаточной функцией** звена или АСР  $W(s)$  называется отношение изображений по Лапласу переменных на выходе и входе динамического звена. Согласно определению передаточная функция определяется как

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$$

Для получения передаточной функции необходимо дифференциальное уравнение, описывающее поведение системы или звена в динамических режимах. При заданной временной характеристики системы возможно использование таблиц, приведенных в различных учебниках по ТАУ и справочниках, связывающих  $X(s)$  и  $W(s)$ .

Передачная функция может быть использована для решения широкого круга задач анализа и синтеза систем автоматического управления. С ее помощью можно определить как установившиеся значения искомой переменной, так и проводить ее исследование во временной области.

Для определения установившегося значения координат в АСР необходимо определить значение изображения искомой переменной для случая, когда оператор Лапласа равен нулю.

$$X_{уст}(t = \infty) = W(s) \times U(s) \Big|_{s=0}$$

### 3.1 Динамическое звено

Для анализа АСР используют метод декомпозиции. Для этого система автоматического управления разбивается на динамические звенья.

**Динамическим звеном** называют устройство любого физического вида и конструктивного оформления, представленное определенным дифференциальным уравнением.

В соответствии с определением классификация динамических звеньев производится по виду дифференциального уравнения, а именно, по его порядку. Так как одними и теми же дифференциальными уравнениями могут описываться устройства любого типа (электрические, электромеханические, гидравлические, тепловые) то такое предположение позволяет использовать для проектирования различных устройств одинаковые подходы.

Динамическое звено можно представить в виде "черного ящика" на который воздействуют управляющее воздействие  $X(t)$  и внешнее возмущение  $F(t)$ , реакция звена на эти воздействия определяется как  $Y(t)$  (рис. 17).

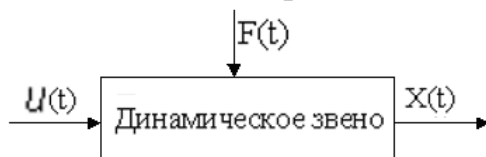


Рисунок 17 - Представление динамического звена

**Установившийся режим** - это режим, при котором расхождение между истинным значением регулируемой величины и ее заданным значением будет постоянным во времени (рис. 18).

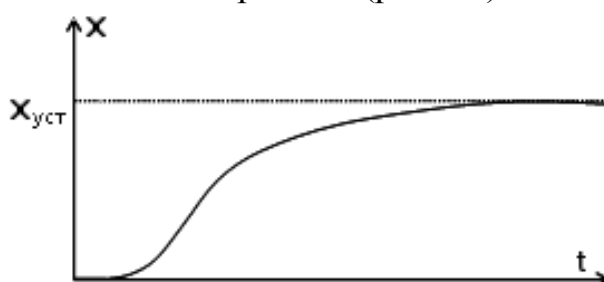


Рисунок 18 – Установившийся режим

**Статической характеристикой** элемента называется зависимость установившихся значений выходной величины от значения величины на входе системы, т.е.

$$x_{уст} = \varphi(u).$$

Статическую характеристику часто изображают графически в виде кривой  $x(u)$  (рис. 19).

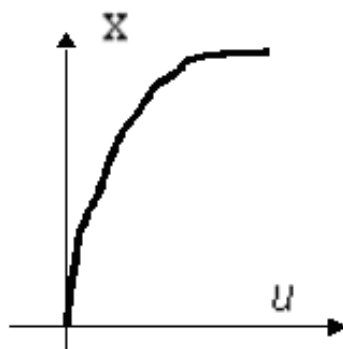


Рисунок 19 - Статическая характеристика

**Статическим** называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии с течением времени устанавливается постоянная выходная

величина. Например, при подаче на вход нагревателя различных значений напряжения он будет нагреваться до соответствующих этим напряжениям значений температуры.

**Астатическим** называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии сигнал на выходе непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т.д.

**Линейным статическим элементом** называется безинерционный элемент, обладающий линейной статической характеристикой:

$$x_{уст} = K * u + a_0.$$

Как видно, статическая характеристика элемента в данном случае имеет вид прямой с коэффициентом наклона  $K$ .

Линейные статические характеристики, в отличие от нелинейных, более удобны для изучения благодаря своей простоте. Если модель объекта нелинейна, то обычно ее преобразуют к линейному виду путем линеаризации.

АСР называется **статической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

АСР называется **астатической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

Переход системы от одного установившегося режима к другому при каких-либо входных воздействиях называется переходным процессом. Переходные процессы могут изображаться графически в виде кривой  $x(t)$  и они характеризуют динамические свойства системы.

Поскольку входные воздействия могут изменяться во времени, то и переходные характеристики будут каждый раз разные. Для простоты анализа систем входные воздействия приводят к одному типовому виду (рис. 20).

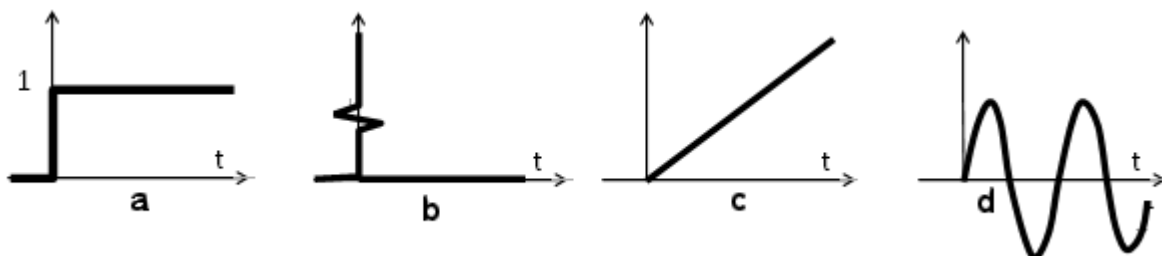


Рисунок 20 – Типы входных воздействий:

- а) единичное, б)  $\delta$ -функция, в) линейное, г) синусоидальное

В зависимости от вида входного воздействия функция  $y(t)$  может иметь

разное обозначение:

**Переходной характеристикой  $h(t)$**  называется реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях, т.е. при  $u(0) = 0$  и  $x(0) = 0$ .

**Импульсной характеристикой  $\omega(t)$**  называется реакция объекта на  $\delta$ -функцию при нулевых начальных условиях.

При подаче на вход объекта синусоидального сигнала на выходе, как правило, в установившемся режиме получается также синусоидальный сигнал, но с другой амплитудой и фазой  $x = A_{\text{вых}} * \sin(\omega * t + \varphi)$ , где  $A_{\text{вых}}$  - амплитуда,  $\omega$  - частота сигнала,  $\varphi$  - фаза.

**Частотной характеристикой (ЧХ, АФХ и др.)** называется зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала объекта в установившемся режиме при приложении на входе гармонического воздействия.

Статическая характеристика любого звена может быть изображена прямой линией, если рассматривается линейная или линеаризованная АСР.

Для звеньев статического типа линейной зависимостью связаны выходная и входная величины в установившемся режиме работы АСР. Коэффициент пропорциональности  $K$  между выходной и входной величинами называется **коэффициентом усиления** звена.

$$X(t) = K U(t).$$

В звеньях интегрирующего типа линейной зависимостью связаны производная выходной величины и входная величина в установившемся режиме.

$$\frac{dX(t)}{dt} = K U(t).$$

Для таких звеньев справедливо равенство

$$X(t) = K \int U(t) \cdot dt.$$

Как отмечалось выше классификация динамических звеньев производится по виду дифференциального уравнения, описывающего поведение звена в динамических режимах работы АСР. Однако вид дифференциального уравнения не является единственным признаком, по которому проводится сравнение динамических звеньев. Для этого используются следующие характеристики:

- Дифференциальные уравнения движения динамического звена.
- Передаточные функции  $W(s)$ ;
- Временные характеристики, к которым относятся:

- переходная функция или переходная характеристика  $h(t)$ ,
- импульсная передаточная функция или функция веса  $w(t)$ ,

Дифференциальные уравнения движения динамического звена, его передаточные функции и частотные характеристики подробно рассмотрены в предыдущих разделах курса.

Временные характеристики определяют вид изменения выходного сигнала при подаче на вход звена типового управляющего воздействия. Это позволяет сравнивать свойства звеньев в динамических режимах работы. Временные свойства звена определяются его переходной и импульсной переходной характеристиками.

Переходная функция или переходная характеристика  $h(t)$  представляет собой переходный процесс на выходе звена, возникающий при подаче на его вход скачкообразного воздействия при величине скачка, равного единице. Такое воздействие называется единичной ступенчатой функцией. и обозначается  $U(t) = 1(t)$  (рис. 21), что соответствует следующим условиям:

$$\begin{cases} U(t) = 0 & \text{при } t < 0 \\ U(t) = 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

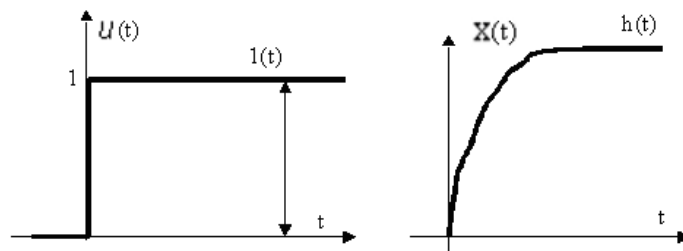


Рисунок 21 - Единичная и переходная функции

Изображение единичной ступенчатой функции определяется как

$$h(s) = L\{1(s)\} = \frac{1}{s}$$

Чтобы определить изображение переходной функции при известной передаточной функции звена  $W(s)$  необходимо выполнить следующую

$$h(s) = \frac{W(s)}{s}$$

операцию:

Ступенчатая функция представляет собой распространенный вид входного воздействия в теории АСР. К такому виду воздействия сводятся возрастание момента на валу двигателя, мгновенное изменение задания на частоту вращения двигателя.

Функция веса или импульсная переходная характеристика представляет собой реакцию звена на единичную импульсную функцию.



Единичная импульсная функция, или  $\delta$ - функция, представляет собой производную от единичной ступенчатой функции. То есть  $\delta(t) = \frac{d}{dt} 1(t)$ .

Дельта-функция тождественно равна нулю во всех точках, кроме  $t = 0$ , где она стремится к бесконечности.

Основное свойство дельта -функции состоит в том, что  $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$ , то есть она имеет единичную площадь.

Нетрудно установить, что изображение дельта-функции определяется

$$\delta(s) = L\{\delta(t)\} = L\left\{\frac{d}{dt} 1(t)\right\} = s \times \frac{1}{s} = 1$$

как

Изображение функции веса определяется как:

$$w(s) = W(s) \cdot \delta(s) = W(s)$$

Очевидно, что изображение передаточной функции совпадает с передаточной функцией звена или АСР (рис. 22).

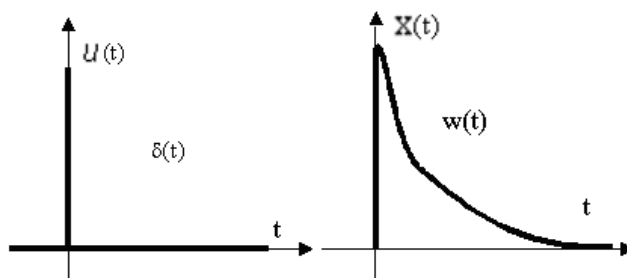


Рисунок 22 - Дельта-функция и функция веса (импульсная переходная характеристика)

### 3.2 Представление АСР в частотной области

Важную роль при описании линейных стационарных систем играют частотные характеристики. Если на вход линейной АСР подать синусоидальное воздействие, то по истечении некоторого времени, когда затухнут все движения, определяемые переходными процессами внутри АСР, на выходе системы установится также гармоническое изменение выходной координаты с той же частотой, которую имеет входная величина, но с иными амплитудами и фазой. Эти величины при прочих равных условиях, будут зависеть от частоты возмущающего воздействия. Такие зависимости называют частотными характеристиками АСР. По частотным характеристикам можно судить о динамических свойствах АСР. Для

линейных систем справедлив принцип суперпозиции, то есть реакция системы на несколько одновременно действующих воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности. Это позволяет рассматривать частотные характеристики отдельно для каждого возмущения.

Периодическое гармоническое воздействие на объект может быть записано в векторной форме как

$$x(t) = X \cdot e^{j\omega t}, \text{ где } X \text{ – амплитуда воздействия, } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ – угловая частота,}$$

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t \text{ – единичный вектор.}$$

Послу затухания собственных колебаний в АСР на ее выходе установятся периодические колебания (рис. 23), определяемые выражением вида:

$$y(t) = Y e^{j(\omega t + \varphi)} = Y e^{j\omega t} e^{j\varphi}, \text{ где } \varphi \text{ — фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного.}$$

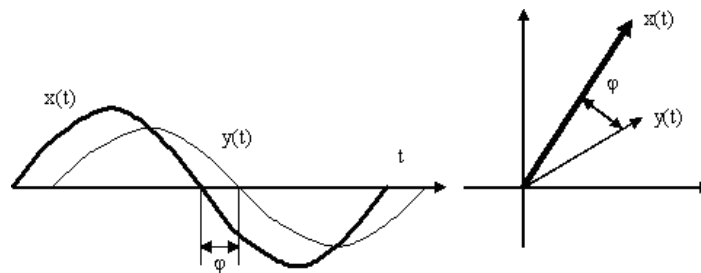


Рисунок 23 - Входные и выходные сигналы АСР

В этом случае можно говорить о комплексном коэффициенте передачи АСР  $K(j\omega)$ , который определяется как

$$K(j\omega) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{Y e^{j(\omega t + \varphi)}}{X e^{j\omega t}} = K(\omega) e^{j\varphi},$$

где  $K(\omega)$  – модуль комплексного коэффициента передачи,

$\varphi$  — фаза вектора комплексного коэффициента передачи

Заметим, что если вместо подстановки сигналов записать дифференциальные уравнения движения системы для преобразования Лапласа и вновь найти отношение выходного сигнала к входному, то полученная, в ходе этого преобразования, передаточная функция совпадет с частотной передаточной функцией. Следовательно, можно отметить две особенности частотной передаточной функции:

- во-первых, частотная передаточная функция получается из обычной заменой оператора Лапласа  $s$  на комплексную частоту  $(j\omega)$ , т.е. в результате перехода от изображения Лапласа к изображению Фурье,

- во-вторых, если дифференциальные уравнения движения системы связывает входной и выходной сигналы (т.е. функции времени), а передаточная функция связывает изображения Лапласа тех же сигналов, то частотная передаточная функция связывает их спектры

Комплексный коэффициент передачи является комплексной величиной, а его компоненты зависят от частоты входного сигнала. Модуль может быть представлен вектором на комплексной плоскости, как это показано на рисунке 24.

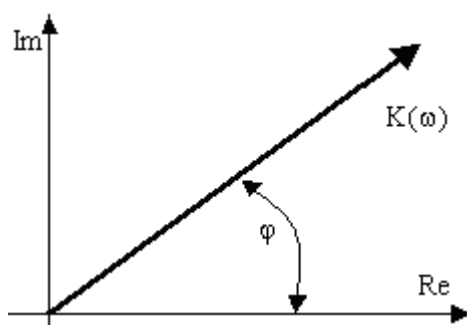


Рисунок 24 - Характеристики комплексного коэффициента передачи

При непрерывном изменении частоты происходит изменение положения вектора комплексного коэффициента передачи АСР, сопровождающееся изменением его модуля и фазы. Конец вектора описывает на комплексной плоскости некоторую кривую, называемую годографом. Годограф — это геометрическое место точек конца вектора комплексного коэффициента передачи на комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до  $\infty$ . Значения частот откладываются непосредственно на годографе, который является амплитудно-фазовой характеристикой системы (АФЧХ). Для определения модуля и фазы комплексного коэффициента передачи на заданной частоте следует соответствующую точку годографа соединить прямой с началом координат. Длина полученного отрезка соответствует модулю комплексного коэффициента передачи. Угол, образованной полученной прямой с положительной вещественной осью, является фазой комплексного коэффициента передачи. Такое представление частотной характеристики АСР достаточно наглядно, но не позволяет просто получать количественные характеристики для сравнения разных систем.

Для решения этой задачи используются:

- Амплитудно-частотная характеристика АСР  $A(\omega)$  — зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты (рис. 25).

$$A(\omega) = |K(j\omega)|$$

- Вещественная частотная характеристика  $P(\omega)$  — зависимость

действительной части комплексного коэффициента передачи от частоты:

$$P(\omega) = \operatorname{Re}\{K(j\omega)\} = |K(j\omega)| \cos(\varphi)$$

- Мнимая частотная характеристика  $Q(\omega)$  – зависимость мнимой части комплексного коэффициента передачи от частоты:

$$Q(\omega) = \operatorname{Im}\{K(j\omega)\} = |K(j\omega)| \sin(\varphi)$$

Эти характеристики связаны между собой и вектором комплексного коэффициента передачи следующими зависимостями:

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2},$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}.$$

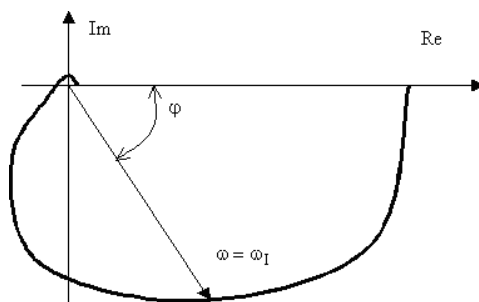


Рисунок 25 - Амплитудно-фазовая частотная характеристика

### 3.3 Основные типовые динамические звенья

Большинство систем может быть представлено совокупностью относительно звеньев с передаточными функциями невысокого порядка. Такие звенья называются типовыми.

**Типовым** называется такое звено, которое описывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка. К таким звеньям относятся:

- безинерционное усилительное звено – звено нулевого порядка,
- апериодическое звено – звено первого порядка,
- интегрирующее звено – звено первого порядка,
- дифференциальное звено – звено первого порядка,
- колебательное звено – звено второго порядка.

**Безинерционное звено** (рис. 26).

Уравнение звена  $y = K \cdot x$ , передаточная функция  $W(s) = K$ .

Параметр  $K$  называется коэффициентом усиления.

Уравнение движения для безинерционного звена имеет вид  $X = k U$ .

Выполняя над этим уравнением преобразование Лапласа получаем

выражение для передаточной функции звена следующего вида:  $W(s) = K$

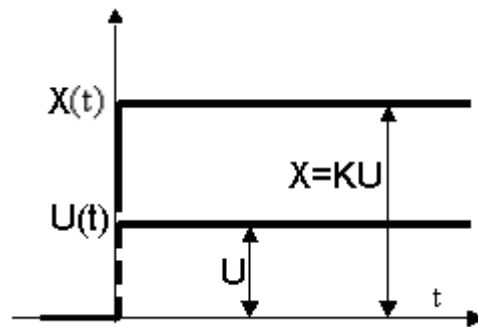


Рисунок 26 - Звено усиливает входной сигнал в K раз

Выполняя обратное преобразование изображения переходной характеристики  $h(s)$ , получаем:  $h(t) = K \cdot 1(t)$  Выходной сигнал такого звена в точности повторяет входной сигнал, усиленный в K раз.

Выполняя аналогичные преобразования над изображением весовой функции, получаем выражение для определения весовой функции.

$$w(t) = K \cdot \delta(t)$$

Примерами таких звеньев являются: механические передачи, датчики, безынерционные усилители и др.

#### Апериодическое звено

Уравнение движения для безынерционного звена имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T}(K \cdot u - x)$$

Выполняя над этим уравнением преобразование Лапласа получаем выражение для передаточной функции звена следующего вида:

$$W(s) = \frac{K}{1 + Ts}$$

Переходная характеристика этого звена имеет вид:

$$h(t) = K \left( 1 - e^{-t/T} \right)$$

А весовая функция:  $w(t)$ .

$$w(t) = \frac{K}{T} e^{-t/T}$$

Вид переходной и весовой характеристик звена приведен на рисунке

27.

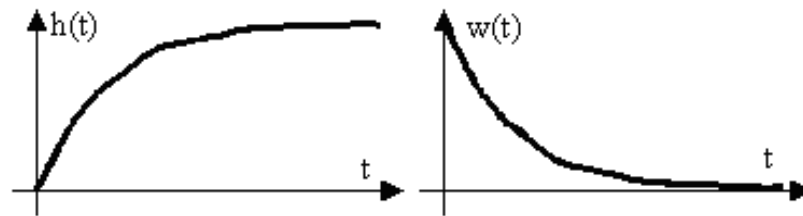


Рисунок 27 - Временные характеристики аperiodического звена

Для построения частотных характеристик звена (рис. 28) воспользуемся выражением для его комплексной передаточной

$$W(j\omega) = \frac{K}{1 + j \cdot \omega T}$$

функцией вида:

Исходя из этого, амплитудно-частотная характеристика звена определяется как:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}}$$

Вещественная  $P(\omega)$  и мнимая  $Q(\omega)$  частотные характеристики звена

$$P(\omega) = \frac{K}{1 + (\omega T)^2} \quad Q(\omega) = -\frac{K\omega T}{1 + (\omega T)^2}$$

определяются как:

АФЧХ звена определяется как:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = \frac{K}{1 + (\omega T)^2} - j \frac{K\omega T}{1 + (\omega T)^2}$$

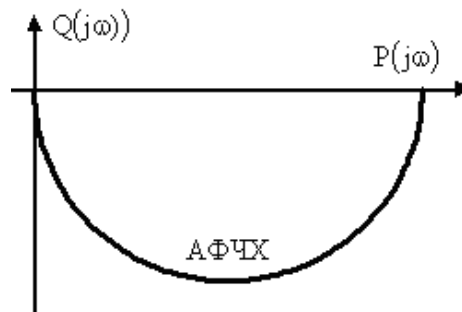


Рисунок 28 - Амплитудно-фазовая характеристика аperiodического звена

### Интегрирующее звено

Уравнение движения для интегрирующего звена имеет вид:

$$\frac{dX}{dt} = K \times U$$

Выполняя над этим уравнением преобразование Лапласа получаем выражение для передаточной функции звена следующего вида:

$$W(s) = \frac{K}{s}$$

Для нахождения временных характеристик звена (рис. 29) определим его реакцию на единичное ступенчатое воздействие.

Переходная характеристика звена определяется как  $h(t) = K \times t$ .

Весовая характеристика определяется как  $w(t) = K$ .

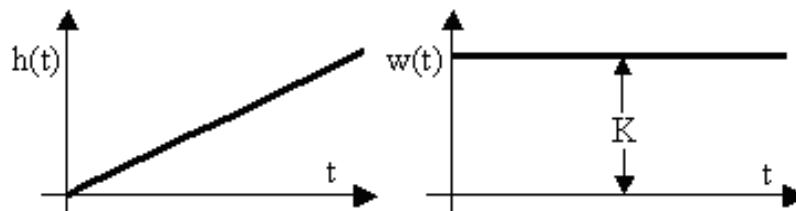


Рисунок 29 - Временные характеристики интегрирующего звена

Для построения частотных характеристик звена воспользуемся выражением для его комплексной передаточной функцией вида:

$$W(j\omega) = \frac{K}{j\omega}$$

Исходя из этого, амплитудно-частотная характеристика звена (рис. 30) определяется как:

$$A(\omega) = \frac{K}{\omega}$$

Вещественная  $P(\omega)$  и мнимая  $Q(\omega)$  частотные характеристики звена определяются как

$$P(\omega) = 0,$$

$$Q(\omega) = -\frac{K}{\omega}.$$

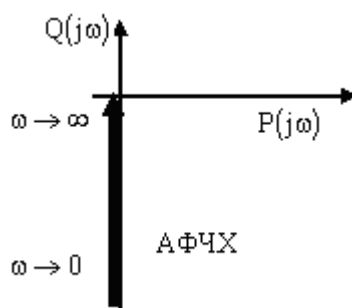


Рисунок 30 - Амплитудно-фазовая частотная характеристика интегрирующего звена

### Дифференцирующее звено

Уравнение движения для дифференцирующего звена имеет вид

$$X = K \times \frac{dU}{dt}$$

Выполняя над этим уравнением преобразование Лапласа получаем выражение для передаточной функции звена следующего вида:  $W(s) = K \cdot s$ .

Для нахождения временных характеристик звена определим его реакцию на единичное ступенчатое воздействие. Переходная характеристика дифференцирующего звена (рис.31) определяется как  $h(t) = K \times \delta(t)$ .

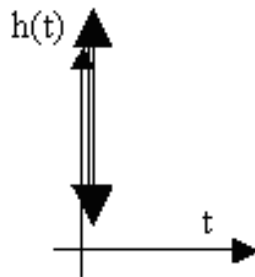


Рисунок 31 - Переходная характеристика дифференцирующего звена

Для построения частотных характеристик звена воспользуемся выражением для его комплексной передаточной функцией вида:  $W(j\omega) = j\omega K$ .

Исходя из этого, амплитудно-частотная характеристика звена (рис. 32) определяется как:  $A(\omega) = K\omega$ .

Вещественная  $P(\omega)$  и мнимая  $Q(\omega)$  частотные характеристики звена определяются как  $P(\omega) = 0$ ,  $Q(\omega) = -K\omega$ .

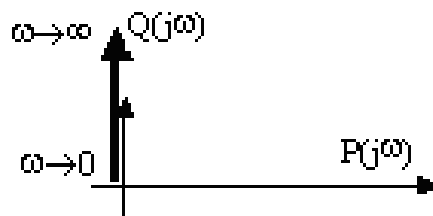


Рисунок 32 - Амплитудно-фазовая частотная характеристика дифференцирующего звена

### Колебательное звено

Уравнение движения для колебательного звена имеет вид

$$T^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dX}{dt} + X = K \times U$$

где  $T$  – постоянная времени звена,  $\zeta$  — коэффициент демпфирования.

Выполняя над этим уравнением преобразование Лапласа, получаем выражение для передаточной функции звена следующего вида:



$$W(s) = \frac{K}{1 + 2\zeta Ts + T^2 s^2}$$

Для нахождения временных характеристик звена определим его реакцию на единичное ступенчатое воздействие. Корни характеристического

уравнения звена определяются как: 
$$q_{1,2} = \frac{-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2}$$

Для колебательного звена характерно различное распределение корней при разных комбинациях его параметров. В общем случае выражение переходная характеристика определяется выражением вида:

$$h(t) = K \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\alpha t} \sin(\Omega_0 t + \varphi) \right],$$

где  $\alpha = \frac{\zeta}{T}$  — декремент затухания;

$\Omega_0 = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T}$  — частота собственных колебаний;

$\varphi = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$  — начальная фаза колебаний.

Временные характеристики колебательного звена (рис. 33) определяются распределением корней его характеристического полинома. На рисунке приведены переходные характеристики колебательного звена при действительно и комплексно-сопряженных корнях характеристического полинома.

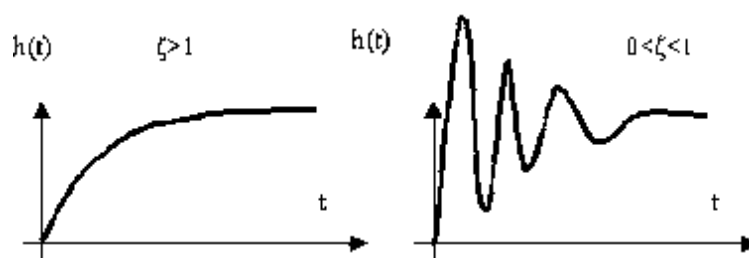


Рисунок 33 - Временные характеристики колебательного звена

Для построения частотных характеристик звена (рис. 34) воспользуемся выражением для его комплексной передаточной функцией вида:

$$W(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega 2\zeta T - \omega^2 T^2}$$

Исходя из этого, амплитудно-частотная характеристика колебательного

звена определяется как:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\zeta T \omega)^2}}$$

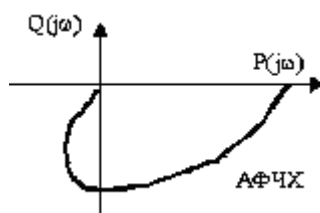
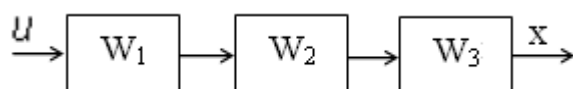


Рисунок 34 - Амплитудно-фазовая характеристика колебательного звена

### Соединения звеньев

Поскольку исследуемый объект в целях упрощения анализа функционирования разбит нами на звенья, то после определения передаточных функций для каждого звена встает задача объединения их в одну передаточную функцию объекта. Вид передаточной функции объекта зависит от последовательности соединения звеньев:

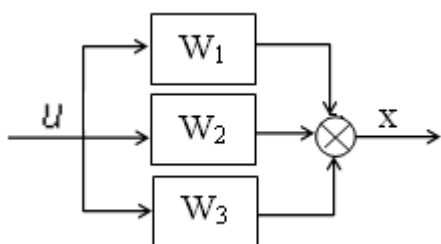
1) *Последовательное соединение.*



$$W_{об} = W_1 W_2 W_3 \dots$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются.

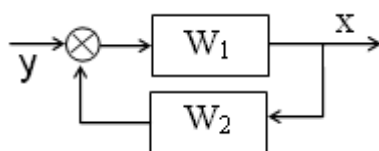
2) *Параллельное соединение.*



$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции складываются.

3) *Обратная связь*



Передаточная функция по заданию (y):

$$W_3(s) = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$$

«+» соответствует отрицательной ОС,

«-» - положительной.

### 3.4 Устойчивость и наблюдаемость систем автоматического управления

В статическом режиме работы все составляющие вектора состояния АСР не зависят от момента времени их рассмотрения и остаются постоянными, соответствующими условию равновесия системы. Это состояние в зависимости от структуры и параметров АСР может быть устойчивым или неустойчивым. Если после изменения вектора внешних воздействий система приходит в состояние, при котором все составляющие вектора ее состояния становятся постоянными, то есть система возвращается в положение равновесия, то это состояние равновесия является устойчивым. В случае, когда после изменение входного сигнала или возмущения, система не стремится в первоначальное состояние, а вектор выходных сигналов изменяется независимо от внешнего воздействия, то такое состояние является неустойчивым. В этом случае система автоматического управления является неустойчивой. Графическая интерпретация таких режимов работы АСР представлена на рисунке 35.



Рисунок 35 - Графическая интерпретация устойчивости

Под устойчивостью понимается свойство АСР возвращаться в исходное состояние после вывода ее из этого состояния и прекращения влияния задающего или возмущающего воздействия.

Только устойчивая система автоматического управления может выполнять возложенные на нее функции. Поэтому одной из основных задач АСР является обеспечение ее устойчивости.

Основы теории устойчивости АСР были заложены А.М. Ляпуновым в его работе "Общая задача устойчивости движений", опубликованной в 1882 г.

Если АСР представляется системой линейных дифференциальных уравнений, то ее устойчивость не зависит от величины и точки приложения внешних возмущений.

Нелинейные системы могут быть устойчивы при малых возмущениях и неустойчивы при больших возмущениях. Теорема Ляпунова устанавливает, что об устойчивости нелинейных систем при малых возмущениях можно судить по их линеаризованным уравнениям, достаточно адекватно

описывающих поведение АСР при малых отклонениях от положения равновесия. Поэтому будем рассматривать только вопросы устойчивости АСР, представляемых линейными или линеаризованными дифференциальными уравнениями.

### ***Математический признак устойчивости.***

При нарушении равновесия АСР, вызванного внешним воздействием, возникают переходные процессы. Вид переходного процесса зависит как от свойств системы, так и от вида возмущения. В переходном процессе присутствуют 2 составляющие:  $X_C(t)$  — свободные движения системы, определяемые начальными условиями и свойствами АСР;

$X_B(t)$  вынужденные движения, определяемые возмущением и свойствами системы. Вид переходного процесса определяется как  $X(t) = X_C(t) + X_B(t)$ .

Чтобы АСР могла достоверно отображать задаваемую информацию необходимо, чтобы в переходном процессе свободная составляющая с течением времени должна стремиться к нулю, то есть должно выполняться

условие вида: 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} X_C(t) \rightarrow 0$$

Характер свободного движения системы определяет ее устойчивость или неустойчивость. Возможные виды переходных процессов в АСР представлены на рисунке 36.

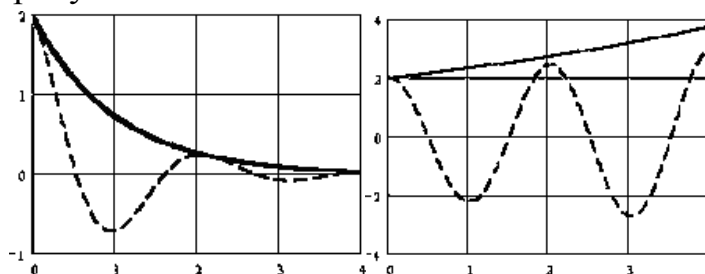


Рисунок 36 - Виды кривых переходных процессов

### ***Критерии устойчивости линейных АСР.***

Прямой анализ устойчивости АСР, основанный на вычислении корней характеристического уравнения, связан с необходимостью вычисления корней, что является непростой задачей. Поэтому в инженерной практике важное значение приобретают правила, позволяющие определять устойчивость системы без вычисления корней характеристического уравнения.

Способы определения устойчивости АСР без вычисления корней характеристического уравнения называются ***критериями устойчивости АСР***. Различают две группы критериев устойчивости: алгебраические –

основанные на анализе коэффициентов характеристического уравнения, и частотные – основанные на анализе частотных характеристик АСР.

### 1. Алгебраический критерий Гурвица

Этот критерий позволяет определить устойчивость АСР, если характеристическое уравнение *замкнутой* системы представлено в виде:

$$C_0 p^N + C_1 p^{N-1} + \dots + C_{N-1} p^1 + C_N = 0$$

Для этого строится главный определитель Гурвица по следующему правилу: по главной диагонали выписываются все коэффициенты от  $C_1$  до  $C_N$  в порядке возрастания коэффициентов. Столбцы вверх от главной диагонали заполняются коэффициентами характеристического уравнения с последовательно возрастающими индексами, а столбцы вниз – коэффициентами с последовательно убывающими индексами. На месте коэффициентов с индексами, большими порядка характеристического уравнения и меньшими нуля, проставляют нули.

$$\Delta_N = \begin{vmatrix} C_1 & C_3 & C_5 & \dots & 0 \\ C_0 & C_2 & C_4 & \dots & 0 \\ 0 & C_1 & C_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & C_N \end{vmatrix}$$

Выделяя в главном определителе Гурвица диагональные миноры, получаем определитель Гурвица низшего порядка. Номер определителя Гурвица определяется номером коэффициента по диагонали, до которого составляют данный определитель.

$$\Delta_1 = |C_1|, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} C_1 & C_3 \\ C_0 & C_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} C_1 & C_3 & C_5 \\ C_0 & C_2 & C_4 \\ 0 & C_1 & C_3 \end{vmatrix}$$

**Определение:** чтобы АСР была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы определитель Гурвица и его диагональные миноры имели знаки, одинаковые со знаком первого коэффициента характеристического уравнения замкнутой АСР. При  $C_0 > 0$  для устойчивости АСР необходимо и достаточно выполнение условий:

$$\Delta_0 > 0, \quad \Delta_1 > 0, \quad \Delta_2 > 0, \quad \dots, \quad \Delta_N > 0, \quad ;$$

### 2. Алгебраический критерий Рауса.

Этот критерий представляет собой систему неравенств, составленных по особым правилам из коэффициентов характеристического уравнения

замкнутой АСР.

В первой строке таблицы записывают коэффициенты характеристического уравнения, имеющие четные индексы в порядке их возрастания. Во второй строке таблицы записывают коэффициенты с нечетными индексами в порядке их возрастания. В последующие строки вписывают коэффициенты, определяемые как

$$D_{k,i} = D_{k+1,i-1} - D_{k+1,i-2} \cdot \frac{D_{1,i-2}}{D_{1,i-1}},$$

где  $i$  – индекс, обозначающий номер строки таблицы,

$k$  – индекс, обозначающий номер столбца таблицы. Число строк таблицы Рауса на единицу превышает порядок характеристического уравнения замкнутой АСР.

Чтобы АСР была устойчивой необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса имели один и тот же знак, то есть были положительными. Если не все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса положительны, то есть АСР неустойчива, число правых корней характеристического уравнения равно числу перемен знака в первом столбце таблицы Рауса.

### **3. Частотный критерий Михайлова.**

Критерий Михайлова – это частотный критерий, позволяющий судить об устойчивости замкнутой системы по поведению ее характеристического вектора на комплексной плоскости. Характеристический вектор получают путем подстановки в выражение для характеристического полинома значения  $p = j\omega$ .

Тогда характеристический вектор представляется комплексной величиной, определяемой как:  $D(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ ,

где  $U(\omega) = C_0 - C_2\omega^2 + C_4\omega^4 \dots + C_n\omega^n - \dots$

$$V(\omega) = \omega \times [C_1 - C_3\omega^2 + C_5\omega^4 \dots]$$

Если задаваться различными значениями  $\omega$  и откладывать значения  $U(\omega)$  по горизонтальной, а  $V(\omega)$  – по вертикальной осям декартовой системы координат, то будет получена кривая, называемая годографом характеристического вектора или годографом Михайлова. Другая формулировка: годографом Михайлова называется множество точек, образованных при движении характеристического вектора АСР при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

То есть для устойчивости АСР необходимо выполнение условия вида:

$$\Delta \arg D(j\omega) = n \frac{\pi}{2}, \quad \omega \rightarrow 0 \rightarrow \infty$$

Для устойчивости АСР необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали в левой полуплоскости. Таким образом, если вектор характеристического полинома замкнутой АСР порядка "n" при изменении частоты от  $-\infty$  до  $+\infty$  описывает в положительном направлении угол  $n\pi$ , то такая система регулирования будет устойчива. В противном случае АСР будет неустойчива.

В силу симметричности кривой, описываемой концом вектора характеристического полинома, можно ограничиться рассмотрением лишь ее части, соответствующей положительным значениям частоты.

**Формулировка критерия:** для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы ее характеристический вектор при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  повернулся в положительном направлении (против часовой стрелки), начиная с положительной вещественной оси на число квадрантов, равное порядку характеристического уравнения.

На рисунке 37 приведены годографы Михайлова для устойчивых и неустойчивых АСР. Изменение коэффициента  $C_0$  вызывает сдвиг годографа Михайлова вдоль горизонтальной оси без его деформации. Это дает возможность оценить предельное значение этого коэффициента, при котором сохраняются условия устойчивой работы АСР.

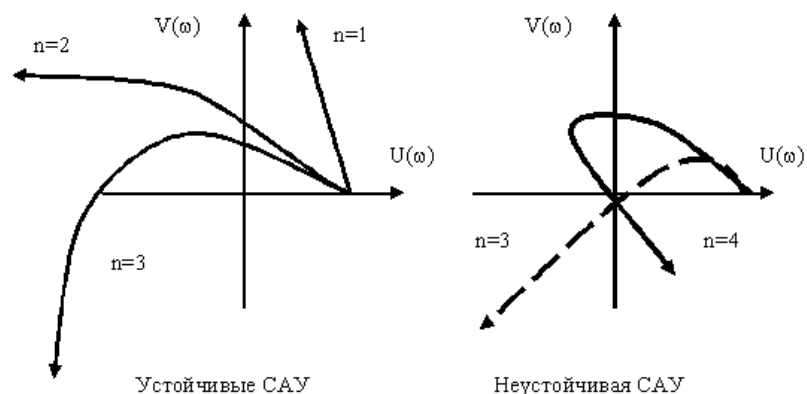


Рисунок 37 - Годографы Михайлова для устойчивых и неустойчивых АСР

#### 4. Частотный критерий Найквиста.

Критерий Найквиста – это частотный критерий, позволяющий судить об устойчивости АСР, замкнутой единичной обратной связью, по виду амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы.

Для формулировки критерия рассмотрим АСР, которая в разомкнутом состоянии характеризуется передаточной функцией вида

$$W_1(s) = \frac{E(s)}{D(s)},$$

где  $D(s)$ ,  $E(s)$  – некоторые полиномы от  $s$ , причем степень знаменателя выше или равна степени числителя.

**Формулировка критерия.** АСР устойчива в замкнутом состоянии, если годограф АФЧХ устойчивой разомкнутой системы не охватывает точки с координатами  $(-1, j0)$  на комплексной плоскости. Эта формулировка справедлива как для статических, так и астатических АСР, то есть систем, характеристическое уравнение которых содержит нулевой корень той или иной степени кратности.

На рисунке 38 приведены АФЧХ устойчивых и неустойчивых АСР.

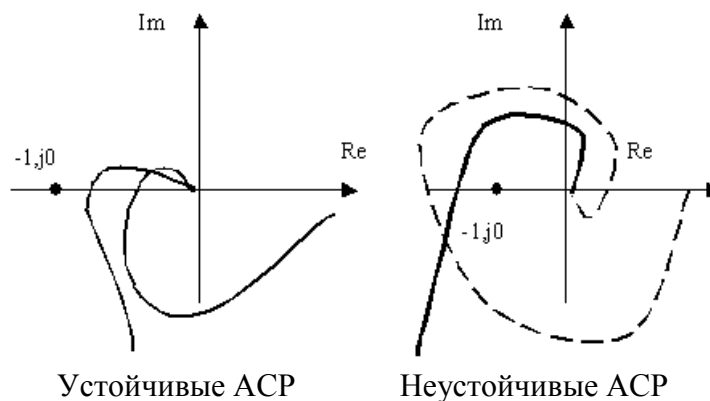


Рисунок 38 - АФЧХ устойчивых и неустойчивых АСР

### 3.5 Оценка качества регулирования АСР

Качество любой системы регулирования трудно определить, поскольку оно описывается с помощью ДУ системы —  $\Phi_x(t)$  — высокого порядка, и зависит от большого количества параметров системы. Поэтому оценивают качество АСР по некоторым ее свойствам, определяют которые с помощью критериев качества.

Критериев качества регулирования много. Их разделяют на 4 группы:

Критерии точности — используют величину ошибки в различных типовых режимах.

Критерии величины запаса устойчивости — оценивают удаленность АСР от границы устойчивости.

Критерии быстродействия — оценивают быстроту реагирования АСР на появление задающего и возмущающего воздействий.

Интегральные критерии — оценивают обобщенные свойства АСР: точность, запас устойчивости, быстродействие.



Существует два основных подхода к оценке качества:

Первый использует информацию о временных параметрах системы:  $h(t)$ ,  $w(t)$ ; расположение полюсов и нулей передаточная функция замкнутой системы  $\Phi(s)$ .

Второй использует информацию о некоторых частотных свойствах системы: полоса пропускания; относительная высота резонансного пика; и т.д.

### 3.5.1 Оценка запаса устойчивости и быстродействия по переходной характеристике

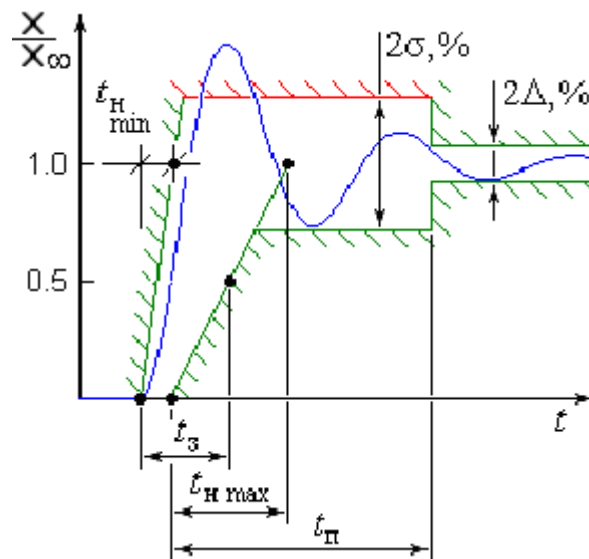


Рисунок 39 - Переходная характеристика АСР

Для оценки качественных показателей работы АСР в динамических режимах анализируется ее реакция на ступенчатое единичное воздействие. При этом переходная характеристика должна находиться в пределах заданной области, параметры которой определяются требованиями технологического агрегата. Исходя из параметров переходной характеристики, можно определить реальные запасы устойчивости АСР по модулю и фазе. Переходная характеристика оценивается совокупностью параметров, которые называются показателями качества. К ним относятся:

перерегулирование  $\sigma$  — отношения максимального отклонения управляемой переменной относительно ее установившегося значения в направлении, противоположном начальному отклонению;

- колебательность  $\mu$  — число максимумов или минимумов переходной

характеристики за время регулирования;

- длительность переходного процесса  $t_p$  – это время, по истечении которого, отклонение управляемой переменной относительно установившегося значения становится и остается по абсолютной величине меньше заданного значения  $\Delta$ , определяемого требованиями, предъявляемым к АСР;

- время достижения первого максимума  $t_{max}$  – момент времени, в который управляемая переменная достигает своего максимального значения;

- время установления  $t_{пmax}$  – промежуток времени по окончании которого управляемая переменная в первый раз достигает своего установившегося значения;

- частота собственных колебаний АСР.

1. Запас устойчивости АСР оценивают по величине перерегулирования:

$$\sigma = 100 \cdot \frac{x_{max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} [\%]$$

2. Быстродействие АСР оценивают по времени окончания переходного процесса  $t_p$ , при заданной допустимой ошибке (трубке):

$$\Delta \in 5; 2,5; 1,5; 1; 0,5; \dots [\%] \text{ от } y_{\infty}, \text{ — установлено ГОСТ-ами.}$$

3. Частоту единичного усиления разомкнутой системы  $\omega_{ср}$  можно оценить по частоте колебаний переходной функции.

При синтезе АСР используют область допустимых отклонений регулируемой величины.

Время нарастания выходной координаты АСР ограничено:

$t_{nmin}$  – допустимым ускорением координат и предельными колебательными режимами;

$t_{nmax}$  – требуемым быстродействием.

### 3.5.2 Корневые методы оценки качества

Поскольку корни передаточной функции АСР, а точнее ее характеристического полинома, однозначно определяют вид переходного процесса, их можно использовать для оценки запаса устойчивости и быстродействия.

Обычно обходятся исследованием только полюсов передаточная функция, т.е. корней характеристического уравнения.

На рисунке 40 показано распределение корней характеристического уравнения АСР. Следует отметить, что, если имеются комплексные корни вида  $-\alpha \pm j\beta$ , то система будет склонна к колебаниям. Оценить эту склонность можно используя показатель запаса устойчивости — колебательность.

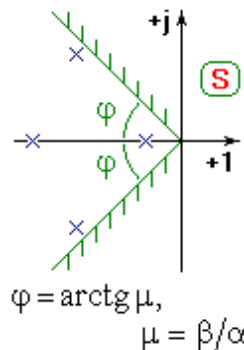


Рисунок 40 - Распределение корней

Колебательность определяется как:

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha}, \quad 0 < \mu < \infty$$

где:  $\alpha$  — коэффициент затухания;  $\beta$  — круговая частота колебаний.

Колебательность определяет другой показатель — затухание амплитуды колебаний  $x(t) = C \cdot e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi)$  за период частоты собственных колебаний АСР.:

$$\xi = \frac{C \cdot e^{-\alpha t} - C \cdot e^{-\alpha \cdot \left(t + \frac{2\pi}{\beta}\right)}}{C \cdot e^{-\alpha t}} = 1 - e^{-\frac{2\pi}{\mu}}, \quad \text{то есть} \quad \mu = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{1}{1-\xi}\right)}.$$

Задание определенной колебательности, ограниченной требованиями технологического агрегата, ограничивает допустимую область расположения корней.

Для оценки быстродействия АСР может использоваться понятие степени быстродействия  $\eta$  то есть абсолютного значения вещественной части ближайшего к мнимой оси корня. Следовательно, если этот корень  $-\alpha \pm j\beta$ , то  $\eta$  равна коэффициенту затухания  $\alpha$ .

Составляющая в переходном процессе  $x_\eta(t) = C_\eta \cdot e^{-\eta t} \sin(\beta t + \varphi)$ , затухает тем медленней, чем меньше  $\eta$ . Если в конце переходного процесса амплитуда колебаний равна  $\Delta C_\eta$ , то время переходного процесса:

$$\Delta C_{\eta} = C_{\eta} \cdot e^{-\eta t_{\pi}} \Rightarrow t_{\pi} = \frac{1}{\eta} \cdot \ln \frac{1}{\Delta}$$

Задание определенной степени быстродействия также ограничивает допустимую область расположения корней характеристического полинома, как это показано на рисунке 41.

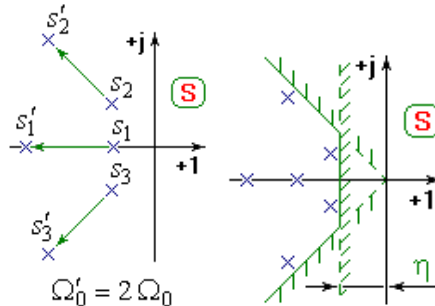


Рисунок 41 - Допустимые области расположения корней характеристического полинома

Степень быстродействия  $\eta$  можно найти используя постановку  $s = z - \eta_{\text{var}}$ , что соответствует смещению корней на величину  $\eta_{\text{var}}$ . Далее, используя любой критерий устойчивости, подбирают значение  $\eta_{\text{var}}$ , при котором система будет на границе устойчивости. И тогда:  $\eta = \eta_{\text{var}}$ .

### 3.5.3 Интегральные оценки качества

Интегральные оценки дают обобщенную оценку быстроты затухания и величины отклонения регулируемой величины, в виде единого числового значения.

Находят применение первые три из перечисленных в списке интегральные оценки:

$I_1$  и  $I_2$  — линейные интегральные оценки (не чувствительны к высшим производным координат АСР).

$I$  и  $I'$  — квадратичные интегральные оценки (не чувствительны к высшим производным координат АСР).

$I + T_1^2 \cdot I'$  — улучшенная квадратичная интегральная оценка (чувствительна к значению скоростной составляющей в движении координат АСР).

$I + T_1^2 \cdot I' + T_2^4 \cdot I'' + \dots$  — интегральные оценки более высоких порядков

(чувствительны к значению скорости, ускорению, координат АСР).

Графическая интерпретация свойств линейной и квадратичной интегральных оценок представлена на рисунке 42.

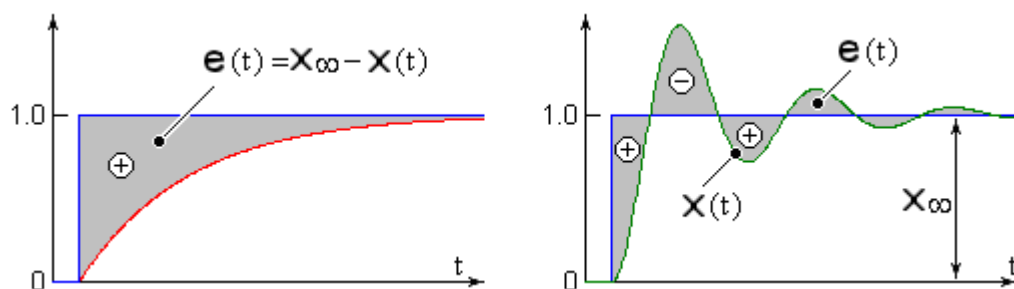


Рисунок 42 - Графическая интерпретация свойств линейной интегральной оценки и квадратичной интегральной оценки

$$I_1 = \int_0^{\infty} e dt \quad \text{и} \quad I_2 = \int_0^{\infty} |e| dt$$

Рассмотрим линейные интегральные оценки:

Очевидно, что чем меньше значение оценки  $I_1$  или  $I_2$ , тем лучше переходный процесс, но:

а) Оценка  $I_1$  не может применяться к колебательному переходному процессу.

б) Аналитическое вычисление оценки  $I_2$  по коэффициентам уравнения ошибки затруднено.

с) Одно значение оценки  $I_2$  может соответствовать переходным процессам с разной колебательностью (если совпадают мажоранты и миноранты).

Определение величин интегральных оценок может производиться аналитическими и численными методами. Последние заключаются в интегрировании величины ошибки АСР в процессе определения ее переходных характеристик. Аналитический расчет квадратичных интегральных оценок позволяет вычислять их величины непосредственно по передаточным функциям АСР.

## 4 ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

### 4.1 Свойства объекта управления

Объект управления является основной составной частью автоматической системы, определяющий ее характер. При всем разнообразии объектов управления они могут быть распределены на небольшое число типов, обладающих аналогичными динамическими характеристиками и характеризующихся следующими свойствами: **нагрузкой, емкостью, способностью к самовыравниванию, запаздыванием процесса.**

Способность объектов аккумулировать рабочую среду, запастись ее внутри объекта называется аккумулирующей способностью или емкостью объекта. Накопление вещества или энергии возможно благодаря тому, что в каждом объекте имеется сопротивление выходу.

Объекты управления подразделяются на одноемкостные и многоемкостные. Объект называется одноемкостным, если он состоит из одного сопротивления и емкости (аппарат в котором регулируется уровень, теплообменник смещения).

Многоемкостным объектом называется такой, который имеет две или более емкости, участвующие в процессе управления и разделенные переходными сопротивлениями (трубчатый теплообменник). В многоемкостных объектах различают емкости на входе и выходе.

Мерой емкости служит **коэффициент емкости** - количество вещества или энергии, которое нужно подвести к объекту, чтобы изменить управляемую величину на единицу:

Чем больше коэффициент емкости объекта, тем меньше скорость изменения управляемого параметра при одном и том же изменении количества подаваемого продукта. А это значит, что легче поддаются управлению те объекты, коэффициент емкости которых больше.

Нагрузка - количество вещества или энергии, отбираемых из объекта для производственных нужд. Изменение нагрузки является сильным возмущающим воздействием. Чем чаще и в больших масштабах изменяется нагрузка тем сложнее управлять объектом.

Способность объекта приходить после возмущения в новое установившееся состояние без вмешательства управляющего устройства называется самовыравниванием объекта.

Объекты, обладающие самовыравниванием, называются

**статическими объектами.** Чем больше величина самовыравнивания, тем меньше отклоняется управляемый параметр от состояния равновесия, существовавшего до возмущения. Самовыравнивание облегчает работу управляющего устройства.

Объекты, не обладающие самовыравниванием, называются **нейтральными** или **астатическими**. Отсутствие самовыравнивания ухудшает возможности управления объектом.

Рассмотрим примеры объектов с самовыравниванием (рис. 43) и без него (рис. 44).

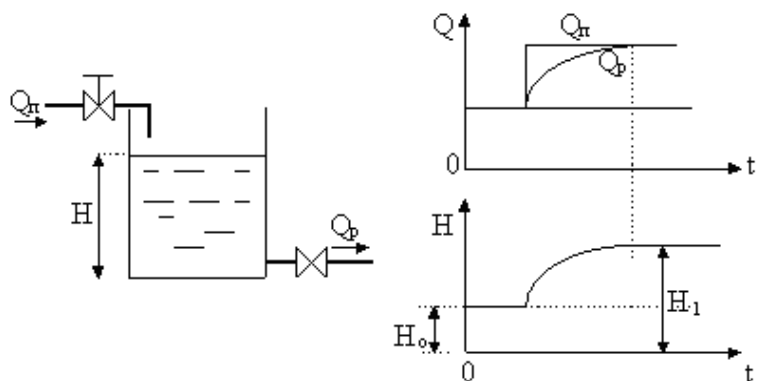


Рисунок 43 – Объект с самовыравниванием

$Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{р}}$  - величины расходов жидкости на притоке и расходе.  $H$  - уровень в емкости.

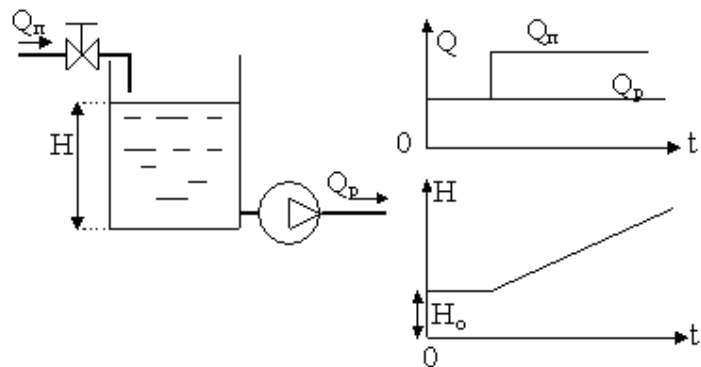


Рисунок 44 – Объект без самовыравнивания

Коэффициент самовыравнивания не является постоянной величиной, а зависит от нагрузки объекта. Максимальной нагрузке соответствует максимальное значение  $\rho$ .

В реальных объектах часто между моментом нарушения равновесия и началом изменения управляемой величины проходит некоторое время - **запаздывание**. Запаздывание объясняется наличием сопротивлений и инерционностью системы.

Различают два вида запаздывания: чистое (или транспортное) и

переходное (емкостное).

Чистым запаздыванием называется время  $\tau$  от момента внесения возмущающего воздействия до начала изменения управляемой величины. Это время необходимо для того, чтобы поток вещества или энергии, обладающий скоростью  $v$ , прошел расстояние  $L$  от места внесения возмущающего воздействия до места, в котором измеряется значение управляемой величины. Например, контроль толщины насыпного слоя на ленте транспортер (рис. 35).

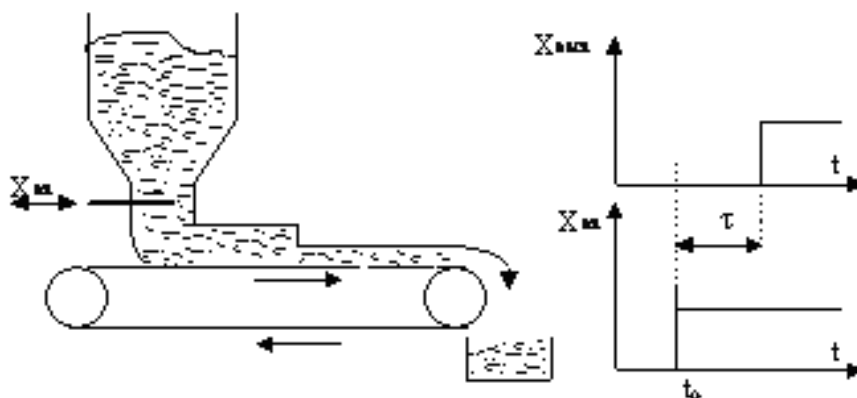


Рисунок 35 – Пример объекта с чистым запаздыванием

Чистое запаздывание смещает во времени реакцию на выходе в объекте по сравнению с моментом нанесения входного воздействия на величину запаздывания, не изменяя величину и форму воздействия.

Обычно в управляемых объектах имеется не только чистое, но и переходное запаздывание, которое характерно для многоемкостных объектов. Запаздывание возникает при преодолении потоком вещества или энергии сопротивлений, разделяющих гидравлические, тепловые и другие емкости объекта (рис. 46).

Время переходного запаздывания определяется отрезком  $\tau_{п}$ . Переходное запаздывание определяется числом емкостей и величиной переходных сопротивлений. Поскольку величины переходных сопротивлений в процессе эксплуатации объекта могут изменяться, величины запаздываний могут возрастать.

Общее запаздывание  $\tau_{общ}$  в объекте управления равно сумме чистого и переходного запаздываний:

$$\tau_{общ} = \tau + \tau_{п}$$

Как чистое, так и переходное запаздывания всегда неблагоприятно сказываются на качестве управления.



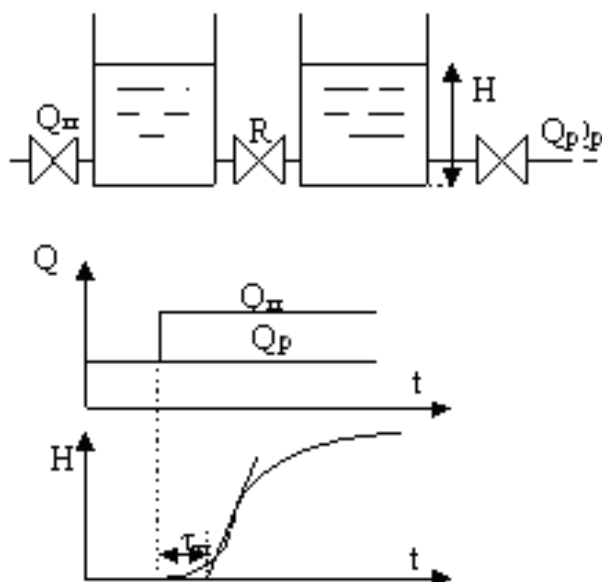


Рисунок 46 – Пример объекта с переходным запаздыванием

## 4.2 Методы получения математического описания

Существуют аналитические, экспериментальные и комбинированные методы получения математического описания объектов управления.

Аналитические методы базируются на использовании уравнений описывающих физико-химические и энергетические процессы, протекающие в исследуемом объекте управления. Это, например, законы сохранения вещества и энергии (уравнения материального баланса). В настоящее время для многих классов объектов управления получены их математические модели. При получении таких описаний обычно оперируют с дифференциальными уравнениями в частных производных, т.к. переменные изменяются как во времени, так и в пространстве.

Экспериментальные методы предполагают проведение серии экспериментов на реальном объекте управления. Обработав результаты экспериментов, оценивают параметры динамической модели объекта, задавшись предварительно ее структурой.

Наиболее эффективными оказываются комбинированные методы построения математической модели объекта, когда, используя аналитически полученную структуру объекта, ее параметры определяют в ходе натуральных экспериментов.

### 4.2.1 Аналитические методы

В качестве примера рассмотрим аналитическую процедуру получения передаточной функции бака с жидкостью (рис. 47).

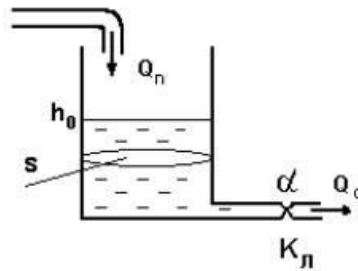


Рисунок 47 - Объект управления - бак с жидкостью

В баке будет осуществляться стабилизация уровня жидкости на номинальном значении  $h_0 = const$ . Регулирование притока  $Q_n$  осуществляется через верхнюю трубу.

Слив жидкости идет через нижнюю трубу через установленный на ней клапан  $K_n$ . Степень открытия клапана  $\alpha$  может изменяться от 0 до 1, устанавливая тем самым нужную величину стока. Площадь сечения бака  $S$ .

Очевидно, что в установившемся режиме работы приток равен стоку  $Q_{n0} = Q_{c0}$ .

Таким образом, управляющей величиной является приток жидкости, управляемой - величина уровня, а главным возмущением - изменение величины степени открытия клапана  $\alpha$ .

Пусть приток жидкости в бак увеличился на  $\Delta Q_n$ . В это случае текущее значение притока будет равно  $Q_n = Q_{n0} + \Delta Q_n$ . Тогда за время  $\Delta t$  уровень возрастет на величину  $\Delta h$  и составит  $h = h_0 + \Delta h$ . Очевидно, что количество жидкости накопленной во времени должно равняться количеству жидкости накопленной в объеме. Отсюда следует уравнение материального баланса

$$S\Delta h = \Delta t(Q_n - Q_c).$$

Для анализа изменения уровня преобразуем это уравнение к виду

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{S}(Q_n - Q_c).$$

Из физики известно, что величина стока связана с уровнем соотношением

$$Q_c = \alpha\sqrt{h}.$$

Эта зависимость носит нелинейный характер. Для получения линейного дифференциального уравнения объекта и его передаточной

функции необходимо произвести линеаризацию нелинейности в окрестности рабочей точки регулирования. Такой подход справедлив, т.к. при использовании регулятора стабилизации, отклонения текущего значения уровня от заданного будут малыми.

Для линеаризации необходимо разложить функцию в ряд Тейлора и отбросить все нелинейные члены. Прделав это, получим

$$Q_c = \alpha\sqrt{h_0} + \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h.$$

С учетом этой зависимости уравнение (1.1) примет вид

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{S} (Q_{x0} + \Delta Q_x - \alpha\sqrt{h_0} - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h).$$

Беря предел, при  $\Delta t \rightarrow 0$ , произведя замену переменных  $h \rightarrow x$ ,  $\Delta Q_x \rightarrow u$ , и учитывая, что  $Q_{x0} = \alpha\sqrt{h_0}$  получим дифференциальное уравнение объекта

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{S} (u - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} x)$$

Известно, что инерционное звено первого порядка с коэффициентом усиления  $K$  и постоянной времени  $T$  описывается дифференциальным уравнением

$$x(t) = -\frac{1}{T} x(t) + \frac{K}{T} u(t),$$

Тогда, из этих формул получим следующие выражения для постоянной времени и коэффициента усиления бака с жидкостью

$$T = \frac{2S\sqrt{h_0}}{\alpha}, \quad K = \frac{2\sqrt{h_0}}{\alpha}.$$

Достоинства аналитических методов:

- не требуют проведения экспериментов на реальном объекте;
- позволяют определить математическое описание еще на стадии проектирования системы управления;
- позволяют учесть все основные особенности динамики объекта управления, как-то наличие нелинейностей, нестационарность, распределенные параметры и т.д.;
- обеспечивают получение универсального математического описания, пригодного для широкого класса аналогичных объектов управления.

Недостатки:

- трудность получения достаточно точной математической модели, учитывающей все особенности реального объекта;

- проверка адекватности модели и реального процесса требуют проведения натуральных экспериментов;

- многие математические модели имеют ряд трудно оцениваемых в численном выражении параметров (например, константы скоростей химических реакций).

#### 4.2.2 Методы экспериментального определения динамических характеристик объектов управления

В настоящее время при расчете настроек регуляторов локальных систем широко используются достаточно простые динамические модели промышленных объектов управления. В частности, использование моделей инерционных звеньев первого или второго порядка с запаздыванием для расчета настроек регуляторов обеспечивает в большинстве случаев качественную работу реальной системы управления.

В связи с этим возникает задача определения численных значений параметров динамических моделей промышленных объектов управления. Опыт показывает, что значительно проще, но с достаточной точностью, определить эти параметры экспериментально на реальном объекте управления. Особенно оправдан такой подход для одномерных объектов управления, работающих совместно с системой автоматической стабилизации.

В зависимости от вида переходной характеристики (кривой разгона) задаются чаще всего одним из трех видов передаточной функции объекта управления:

- в виде передаточной функции инерционного звена первого порядка

$$W_0(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{T_s + 1} \quad \text{где } K, T, \tau \text{ коэффициент усиления, постоянная}$$

времени и запаздывание, которые должны быть определены в окрестности номинального режима работы объекта.

Для объекта управления без самовыравнивания передаточная функция имеет вид

$$W_0(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{s}$$

Более точно динамику объекта описывает модель второго порядка с запаздыванием

$$W_0(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

Экспериментальные методы определения динамических характеристик объектов управления делятся на два класса:

1. Методы определения временных характеристик объекта управления.
2. Методы определения частотных характеристик объекта управления.

Временные методы определения динамических характеристик делятся, в свою очередь, на активные и пассивные.

Активные методы предполагают подачу на вход объекта пробных тестирующих сигналов, каковыми являются

- регулярные функции времени (ступенчатый или прямоугольный импульсы, гармонический сигнал, периодический двоичный сигнал);
- пробные сигналы случайного характера (белый шум, псевдослучайный двоичный сигнал - ПСДС).

В зависимости от вида пробного сигнала выбирают соответствующие методы обработки выходного сигнала объекта управления. Так, например, при подаче ступенчатого управляющего сигнала, снимают кривую разгона объекта, а при подаче прямоугольного импульсного сигнала снимают кривую отклика. Кривая отклика снимается для объектов, не допускающих подачу на вход объекта ступенчатых сигналов.

Достоинствами активных методов являются:

- достаточно высокая точность получения математического описания;
- относительно малая длительность эксперимента.

Следует учитывать, что активные методы, в той или иной степени, приводят к нарушению нормального хода технологического процесса. Поэтому проведение эксперимента должно быть тщательно спланировано.

В пассивных методах на вход объекта не подаются никакие пробные сигналы, а лишь фиксируется естественное движение объекта в процессе его нормального функционирования. Полученные реализации массивов данных входных и выходных сигналов обрабатываются статическими методами. По результатам обработки получают параметры передаточной функции объекта. Однако, такие методы имеют ряд недостатков:

- малая точность получаемого математического описания, (т.к. отклонения от нормального режима работы малы);
- необходимость накопления больших массивов данных с целью повышения точности (тысячи точек);
- если эксперимент проводится на объекте, охваченном системой регулирования, то наблюдается эффект корреляции (взаимосвязи) между входным и выходным сигналами объекта через регулятор. Такая взаимосвязь снижает точность математического описания.

### 4.2.3 Определение динамических характеристик объекта управления по его кривой разгона

При определении динамических характеристик объекта по его кривой разгона на вход подается или ступенчатый пробный сигнал или прямоугольный импульс. Во втором случае кривая отклика должна быть построена до соответствующей кривой разгона.

При снятии кривой разгона необходимо выполнить ряд условий:

1. Если проектируется система стабилизации, то кривая разгона должна сниматься в окрестности рабочей точки процесса.

2. Кривые разгона необходимо снимать как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. По виду кривых можно судить о степени асимметрии объекта. При небольшой асимметрии расчет настроек регулятора рекомендуется вести по усредненным значениям параметров передаточных функций. Линейная асимметрия наиболее часто проявляется в тепловых объектах управления.

3. При наличии зашумленного выхода желательно снимать несколько кривых разгона с их последующим наложением друг на друга и получением усредненной кривой.

4. При снятии кривой разгона необходимо выбирать наиболее стабильные режимы процесса, например, ночные смены, когда действие внешних случайных возмущений маловероятно.

5. При снятии кривой разгона амплитуда пробного входного сигнала должна быть, с одной стороны, достаточно большой, чтобы четко выделялась кривая разгона на фоне шумов, а, с другой стороны, она должна быть достаточно малой, чтобы не нарушать нормального хода технологического процесса.

Сняв кривую разгона, и оценив характер объекта управления (с самовыравниванием или без) можно определить параметры соответствующей передаточной функции. Передаточную функцию вида (1.5) рекомендуется применять для объектов управления с явно выраженной доминирующей постоянной времени (однородный объект). Перед началом обработки кривую разгона рекомендуется пронормировать (диапазон изменения нормированной кривой  $0 \div 1$ ) и выделить из ее начального участка величину чистого временного запаздывания.

Рассмотрим способ нормирования переходных процессов.

Пусть нами получены кривые изменения входной  $u^*(t)$  и выходной  $x^*(t)$  переменных. Эти переменные записываются во время экспериментов на действующих промышленных (или лабораторных) установках и имеют,

поэтому, конкретную размерность (например  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{м}^3/\text{сек}$ ,  $\text{атм.}$  и т.п.). В этих условиях можно считать, что до начала эксперимента по снятию кривой разгона входная величина имела значение  $u^*(0)$ , а выходная  $x^*(0)$ . После подачи ступенчатого воздействия на вход объекта входная величина после окончания переходного процесса получила значение  $u^*(\infty)$ , а выходная  $x^*(\infty)$ . В этом случае безразмерная форма выходной величины рассчитывается по формуле

$$x(t) = \frac{x^*(t) - x^*(0)}{x^*(\infty) - x^*(0)},$$

а безразмерная форма входной величины рассчитывается по формуле

$$u(t) = \frac{u^*(t) - u^*(0)}{u^*(\infty) - u^*(0)}$$

В этом случае получают для дальнейшей работы нормированные кривые изменения входной и выходной величин.

Пример1. Дана нормированная кривая разгона объекта, у которой заранее выделена величина чистого запаздывания  $\tau_z = 3 \text{ мин}$  (рис. 48).

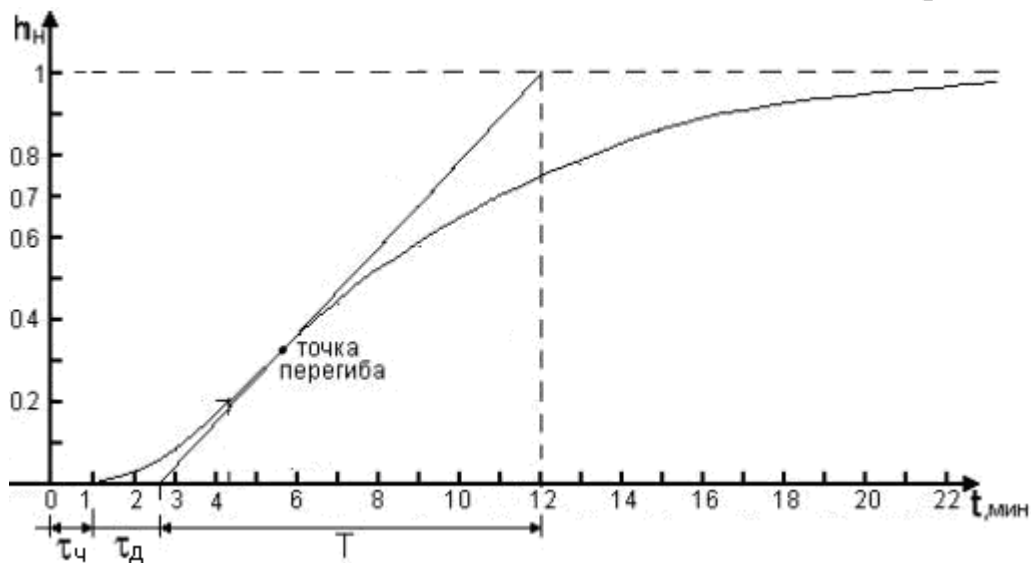


Рисунок 48 - График нормированной кривой разгона

Динамический коэффициент усиления  $K$  объекта определяется как отношение приращения выходного сигнала к приращению входного в окрестности рабочей точки.

Динамические характеристики объектов по кривой разгона можно определить методом касательной к точке перегиба кривой разгона.

В этом случае точка перегиба соответствует переходу кривой от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала. Постоянная времени  $T$  и динамическое запаздывание определяются

в соответствии с графиком кривой разгона, т.е.  $\tau = \tau_{\text{ч}} + \tau_{\text{д}}$ .

Пример 2 Дана кривая разгона объекта без самовыравнивания (рис 49).

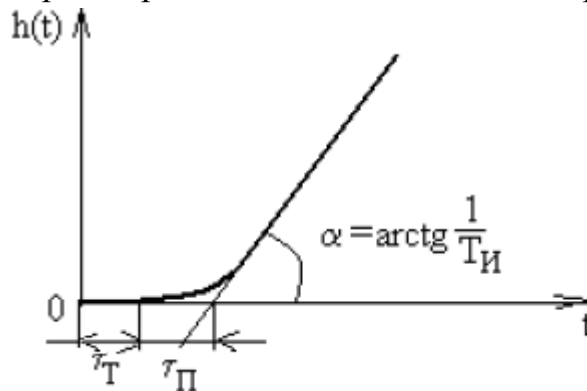


Рисунок 49 - Кривая разгона объекта без самовыравнивания

Выделим чистое запаздывание  $\tau_T$ , переходное запаздывание  $\tau_{\text{П}}$ .

Определим величину общего запаздывания  $\tau = \tau_T + \tau_{\text{П}}$ . Определяем постоянную времени интегрирования  $T_{\text{И}} = \frac{1}{\text{tg} \alpha}$ .

Получим передаточную функцию модели объекта  $W_0(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_{\text{И}} s}$ .



## 5 ТИПОВЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

АСР создают на выходе исполнительного элемента регулирующее воздействие, прикладываемое к объекту, которое определяется величиной ошибки.

Функциональная связь между регулирующим воздействием и ошибкой называется законами регулирования. Представление регулятора в виде звена структурной схемы дано на рисунке 50.

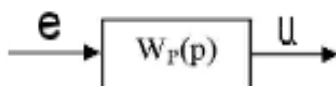


Рисунок 50 - Регулятор в виде звена структурной схемы:  
 $e$  - ошибка (рассогласование),  $u$  - регулирующее воздействие

### 5.1 Позиционный регулятор

Позиционный(ПЗ) регулятор - это регулятор, у которого регулирующий орган может занимать ограниченное число определенных положений. Наиболее часто используются 2-х и 3-х позиционные регуляторы с положительной и отрицательной зоной регулирования.

Математическая запись 2-х позиционного закона с положительной зоной регулирования:

$$\begin{cases} u=0, & \text{если } e > 0 \\ u=1, & \text{если } e \leq 0 \end{cases}$$

Статическая характеристика 2-х позиционного регулятора с положительной зоной регулирования показана на рисунке 51.

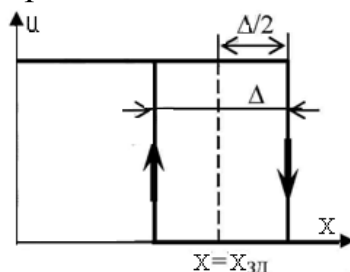


Рисунок 51 - Статическая характеристика 2-х позиционного регулятора с положительной зоной регулирования

На рисунке  $\Delta$  - нейтральная зона или зона регулирования, которая является настройкой регулятора. При работе такого регулятора возникает

петля гистерезиса. Вследствие присутствия гистерезиса регулируемый параметр на выходе объекта будет совершать непрерывные колебания около заданного значения. Это можно проиллюстрировать на примере объектов с ярко выраженными отдельными свойствами (рис. 52)

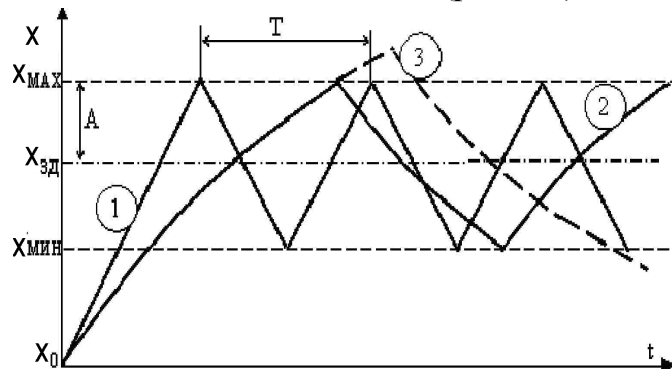


Рисунок 52 - Переходный процесс АСР с ПЗ регулятором и объектами разных свойств:

- 1- объект без самовыравнивания; 2- объект с самовыравниванием; 3- объект с самовыравниванием и с запаздыванием

Переходный процесс на выходе объекта при работе ПЗ регулятора - автоколебательный процесс со следующими характеристиками:

- $T$  - период;
- $A$  - амплитуда колебаний. Амплитуда  $A$  уменьшается при сужении зоны регулирования  $\Delta$ , но при этом будет нарастать частота и уменьшаться период колебаний, а следовательно исполнительный механизм быстро выработает свой ресурс.

Таким образом, при настройке регулятора идут на компромисс:  $\Delta$  выбирается по возможности минимальной, определяется свойствами реального объекта и требованиями к качеству его регулирования; а  $T$  - исходя из конструктивных соображений.

Статическая характеристика 2-х позиционного регулятора с отрицательной зоной регулирования показана на рисунке 53.

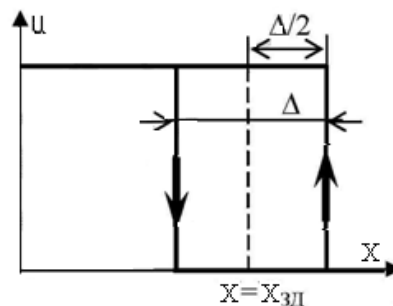


Рисунок 53 - Статическая характеристика 2-х позиционного регулятора с отрицательной зоной регулирования

Переключение идет раньше, чем параметр достигает заданного значения.

Достоинства этой характеристики ПЗ регулятора состоит в том, что можно уменьшить амплитуду в 1,5 раза для объекта с запаздыванием.

Недостатки - это возможность выпадения регулятора из алгоритма работы, что показано на рисунке 54.

Использование ПЗ регуляторов - в основном для инерционных объектов, где отношение запаздывания к постоянной времени ( $\tau/T > 0,2$ ) больше 0,2.

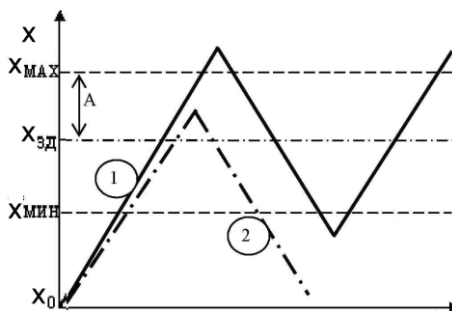


Рисунок 54 - Переходная характеристика работы АСР в случае выпадения из алгоритма управления

## 5.2 Пропорциональный регулятор

Пропорциональный(П) регулятор (статической регулятор) -регулятор, у которого перемещение регулируемого органа пропорционально отклонению регулируемого параметра от заданного значения.

Уравнение динамики:

$$u = K_p e = \frac{1}{\delta} e$$

Настройка регулятора:

$K_p$  - коэффициент усиления (передачи) регулятора;

$\delta$  - предел пропорциональности (%) показывает в каких пределах должна изменяться регулируемая величина, чтобы  $u$  изменилось на 100%.

Статическая характеристика пропорционального регулятора представлена на рисунке 55.

Достоинства: простота, высокое быстродействие и минимальное время регулирования.

Недостаток – наличие статической ошибки регулирования.

Статическая ошибка возникает за счет введения жесткой обратной связи (связи по положению регулирующего органа).

Переходная характеристика:  $h(t)=K_p$ .

Передаточная функция:  $W(s) = K_p$ .

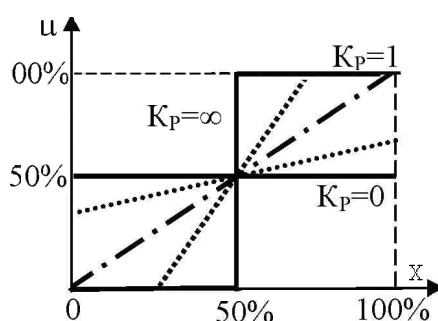


Рисунок 55 - Статическая характеристика П регулятора

### 5.3 Интегральный регулятор

Интегральный (И) регулятор - это регулятор, у которого скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна отклонению регулируемого параметра от заданного значения.

Уравнение динамики:

$$u = \frac{1}{T_{И0}} \int e dt$$

Настройка регулятора

$T_{И}$  - время интегрирования - это время перемещения регулирующего органа из одного крайнего положения в другое при 100% отклонении регулируемого параметра (рис. 56).

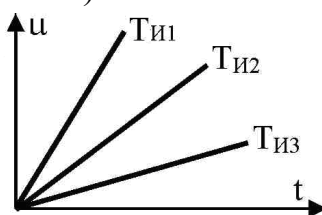


Рисунок 56 - Переходная характеристика И регулятора

С ростом  $T_{И}$  уменьшается наклон характеристики.

$$W(s) = \frac{1}{T_{И}s}$$

Передаточная функция:

Достоинство - отсутствие отклонения от заданного значения в конце переходного процесса, но только если объект с самовыравниванием.

Недостаток - малое быстродействие регулятора.

Скорость быстродействия зависит от настройки регулятора: снижение  $T_{И}$  приводит к увеличению быстродействия, но и к снижению устойчивости.

## 5.4 Пропорционально-интегральный регулятор

Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор - это регулятор, у которого регулирующее воздействие пропорционально как отклонению, так и интегралу отклонения регулируемой величины.

Уравнение динамики:

$$u = K_P e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt$$

Передаточная функция ПИ-регулятора с независимыми настройками:

$$W_{ПИ} = W_{П} + W_{И} = K_P + \frac{1}{T_I s}$$

где  $W_{П}$  и  $W_{И}$  - передаточные функции П и И регуляторов.

Настройки регулятора:

$K_P$  - коэффициент усиления, в пределе если  $K_P \rightarrow 0$ , то ПИ  $\rightarrow$  И регулятор.

Переходная характеристика пропорционально-интегрального регулятора представлена на рисунке 57.

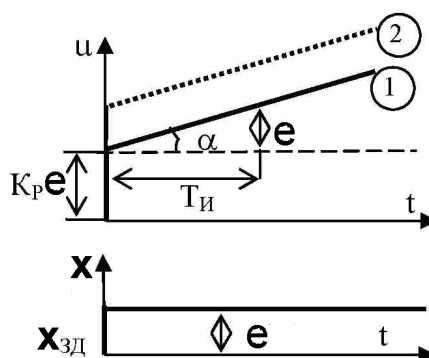


Рисунок 57 - Переходная характеристика ПИ регулятора

В начальный момент времени регулирующее воздействие скачкообразно изменяется на величину  $K_P e$ , а затем плавно возрастает и за время интегрирования увеличивается еще на величину входного сигнала.

Достоинства - сочетание свойств П- и И-регуляторов:

- высокое быстродействие;
- регулирование без статических ошибок;
- отсутствие ограничений на свойства объекта.

Для улучшения динамических свойств обратная связь в таких регуляторах реализуется не по положению регулирующего органа, а по

скорости изменения регулируемого параметра. Гибкая отрицательная обратная связь действует только в переходные моменты времени, при прекращении изменения перестает действовать обратная связь и остается только интегральная составляющая.

ПИ регулятор используется, если необходимо вести процесс без статической ошибки регулирования и когда возмущение на входе объекта изменяется не резко по своей величине (плавно, но может принимать большие значения) и когда запаздывание в системе не велико ( $T/T \ll 1$  -- мало)

## 5.5 Пропорционально -интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор

Дифференциальный (Д) регулятор - это регулятор, у которого есть составляющая пропорциональная скорости изменения отклонения регулируемого параметра. Реально существует две структуры дифференциальных регуляторов.

Уравнение динамики:

$$u = K_p e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt}$$

Передаточная функция ПИД регулятора:

$$W_{\text{ПИД}} = K_p + \frac{1}{T_I s} + T_D s$$

Настройки регулятора:

- $K_p$  - коэффициент усиления;
- $T_I$  - время интегрирования;
- $T_D$  - время дифференцирования.

На рисунке 58 показаны: П - пропорциональная составляющая ( $K_p$ ); И -

интегральная составляющая  $(\alpha = \arctg \frac{1}{T_I})$ ; Д - дифференциальная составляющая  $(\int_0^t x dt = T_D)$

Достоинства: устойчивая АСР с астатическими и статическими объектами и регулирование без статической ошибки.

Недостаток - дифференциальная составляющая увеличивает воздействие на входе объекта и снижает устойчивость системы в целом.

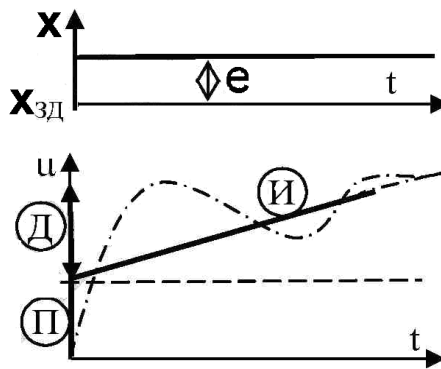


Рисунок 58 - Переходная характеристика ПИД регулятора

Если возмущение изменяется скачкообразно и если присутствуют значительные запаздывания в системе, то для получения качественного процесса регулирования используются регуляторы с дифференциальной составляющей. Но они являются наиболее сложными и наиболее дорогими и имеют сложный процесс настройки.

## 5.6 Выбор типа регулятора

Для того, чтобы выбрать тип регулятора и определить его настройки, необходимо знать:

- статические и динамические характеристики объекта управления,
- требования к качеству процесса регулирования,
- характер возмущений, действующих на процесс регулирования.

Выбор типа регулятора обычно начинается с простейших двухпозиционных регуляторов и может заканчиваться самонастраивающимися микропроцессорными регуляторами. Обычно, в качестве серийных предполагаются непрерывные регуляторы, реализующие П, И, ПИ и ПИД законы регулирования.

Теоретически, с усложнением закона регулирования качество работы системы улучшается. Известно, что на динамику регулирования наибольшее влияние оказывает величина отношения запаздывания к постоянной времени объекта  $\tau/T$ .

Наибольшее быстродействие обеспечивает П-закон регулирования. Однако, в системах с запаздыванием, которые очень распространены на практике, такой регулятор не обеспечивает высокой точности регулирования, так как в этом случае велика величина статической ошибки.

Наиболее распространенным на практике является ПИ-регулятор, который обладает следующими достоинствами:

- обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования,
- прост в настройке,
- обладает малой чувствительностью к шумам в канале измерения.

Для быстрой приближенной оценки значений параметров настройки регулятора для трех видов оптимальных типовых процессов регулирования можно использовать наборы формул, сведенные в таблицы 2, 3.

Таблица 2 – Настройки регулятора для объектов без самовыравнивания

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	апериодический	с 20% перерегулированием	$\min = \int_0^{\infty} e^2 dt$
<b>П</b>	$K_P = \frac{0,4}{T/\Gamma}$	$K_P = \frac{0,7}{T/\Gamma}$	—
<b>ПИ</b>	$K_P = \frac{0,4}{T/\Gamma}$ $T_I = 6T$	$K_P = \frac{0,7}{T/\Gamma}$ $T_I = 3T$	$K_P = \frac{1}{T/\Gamma}$ $T_I = 4T$
<b>ПИД</b>	$K_P = \frac{0,6}{T/\Gamma}$ $T_I = 5\tau$ $T_D = 0,2\tau$	$K_P = \frac{1,1}{T/\Gamma}$ $T_I = 2\tau$ $T_D = 0,4\tau$	$K_P = \frac{1,4}{T/\Gamma}$ $T_I = 1,6\tau$ $T_D = 0,5\tau$

Таблица 3 – Настройки регулятора для объектов с самовыравниванием

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	апериодический	с 20% перерегулированием	$\min = \int_0^{\infty} e^2 dt$
<b>И</b>	$K_P = \frac{1}{4,5 \cdot K_{об} \cdot T}$	$K_P = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об} \cdot T}$	$K_P = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об} \cdot T}$
<b>П</b>	$K_P = \frac{0,3}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$	$K_P = \frac{0,7}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$	$K_P = \frac{0,9}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$
<b>ПИ</b>	$K_P = \frac{0,6}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = 0,6 \cdot T$	$K_P = \frac{0,7}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = 0,7 \cdot T$	$K_P = \frac{1}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = T$
<b>ПИД</b>	$K_P = \frac{0,95}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = 2,4 \cdot \tau$ $T_D = 0,4 \cdot \tau$	$K_P = \frac{1,2}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = 2 \cdot \tau$ $T_D = 0,4 \cdot \tau$	$K_P = \frac{1,4}{K_{об} \cdot T/\Gamma}$ $T_I = 1,3 \cdot \tau$ $T_D = 0,5 \cdot \tau$



## 6 СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Под термином «автоматизация» понимается совокупность методических, технических и программных средств, обеспечивающих проведение процесса измерения без непосредственного участия человека. Автоматизация является одним из основных направлений научно-технического прогресса. Цели автоматизации весьма разнообразны. Можно говорить о научных целях автоматизации (повышение качества и эффективности научных результатов), об экономических целях (сокращение трудозатрат времени и повышение производительности труда) и о социальных целях (избавление персонала от рутинного труда).

### 6.1 Государственная система приборов

Все средства контроля и регулирования технологических процессов входят в государственную систему приборов (ГСП). Характерной особенностью ГСП является:

- 1) блочно-модульный принцип, лежащий в основе конструкций устройств;
- 2) унификация входных - выходных сигналов и сигналов питания.

Сами приборы делятся на гидравлические, пневматические, электрические.

Первичные приборы (датчики) могут преобразовывать измеряемый параметр в какой-либо унифицированный сигнал.

- 1) Пневматические унифицированные сигналы - сигналы давления сжатого воздуха (диапазон изменения сигнала  $(0,2 \div 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2})$ ; расстояние передачи сигнала до 300 м.)

- 2) Электрические унифицированные сигналы имеют много диапазонов, которые можно разделить на токовые (сигналы постоянного тока), например: 0 - 20 мА и др. и сигналы напряжения постоянного тока, например: 0 - 1 В, 0 - 10 В и др.

Первичные приборы (датчики) могут преобразовывать измеряемый параметр в какой-либо унифицированный сигнал. Если же датчик выдает неунифицированный сигнал, то для приведения его к стандартному диапазону должен быть установлен соответствующий преобразователь.

## 6.2 Измерения технологических параметров

**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 конечным и начальным 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.

Любые измерения сопровождаются погрешностями двух типов:

**случайные погрешности**, имеющие случайную природу (причина их неизвестна);

**систематические погрешности**, обусловленные несовершенством метода измерения, конструкцией прибора.

Виды погрешностей измерений:

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.

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} 100\%$$

2) **относительные**: (выраженные в процентах);

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

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

3) **приведенные**: , 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.

### 6.3 Классификация контрольно-измерительных приборов

На нефтеперерабатывающих и химических производствах наиболее часто измеряемыми величинами являются температура **T**, давление **P**, расход **G** и уровень **H**. На них приходится около 80 % всех измерений.

При измерениях используются различные измерительные приборы, которые классифицируются по ряду признаков. Общей градацией является разделение их на приборы для измерения: механических, электрических, магнитных, тепловых и других физических величин.

Классификация по роду измеряемой величины указывает, какую

физическую величину измеряет прибор (давление  $P$ , температуру  $T$ , расход  $F$ , уровень  $L$ , количество вещества  $Q$  и т.д.).

Исходя из признака преобразования измеряемой величины, измерительные приборы разделяют на приборы:

- а) непосредственной оценки;
- б) сравнения; а по характеру измерения: стационарные и переносные.

По способу отсчета измеряемой величины измерительные приборы бывают: показывающие, регистрирующие, суммирующие.

**Первичные приборы** или **первичные преобразователи** предназначены для непосредственного преобразования измеряемой величины в другую величину, удобную для измерения или использования. Различают генераторные, параметрические и механические преобразователи:

1) Генераторные осуществляют преобразование различных видов энергии в электрическую, то есть они генерируют электрическую энергию (термоэлектрические, пьезоэлектрические, электрокинетические, гальванические и другие датчики).

2) К параметрическим относятся реостатные, тензодатчики, термосопротивления и т.п. Им для работы необходим источник энергии.

3) Выходным сигналом механических первичных преобразователей (мембранных, манометров, дифманометров, ротаметров и др.) является усилие, развиваемое чувствительным элементом под действием измеряемой величины.

**Температура вещества** - величина, определяемая внутренней кинетической энергией теплового движения молекул. Можно выделить следующие типы термометров:

- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения жидких тел;
- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения твердых тел;
- термометры газовые манометрические;
- термометры жидкостные манометрические;
- конденсационные;
- электрические;
- термометры сопротивления;
- оптические монохроматические пирометры;
- оптические цветковые пирометры;
- радиационные пирометры.

Под давлением в общем случае понимают предел отношения нормальной составляющей усилия к площади, на которую действует усилие.

В зависимости от природы контролируемого процесса нас интересует абсолютное давление  $P_a$  или избыточное  $P_{и}$ . При измерении  $P_a$  за начало отсчета принимается нулевое давление, которое можно себе представить как давление внутри сосуда после полной откачки воздуха. Естественно, достигнуть  $P_a = 0$  невозможно.

**Барометрическое** давление  $P_{бар}$  - давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы.

**Избыточное** давление представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлениями:

### ***Классификация приборов для измерения давления:***

#### **I. По принципу действия:**

- 1) жидкостные (основанные на уравнивании давления столбом жидкости);
- 2) поршневые (измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень);
- 3) пружинные (давление измеряется по величине деформации упругого элемента);
- 4) электрические (основанные на преобразовании давления в какую-либо электрическую величину).

#### **II. По роду измеряемой величины:**

- 1) манометры (измерение избыточного давления);
- 2) вакуумметры (измерение давления разрежения);
- 3) мановакуумметры (измерение как избыточного давления, так и давления разрежения);
- 4) напорометры (для измерения малых избыточных давлений);
- 5) тягомеры (для измерения малых давлений разрежения);
- 6) тягонапорометры;
- 7) дифманометры (для измерения разности давлений);
- 8) барометры (для измерения барометрического давления).

**Количество вещества** выражается в единицах объема или массы (т.е. в  $m^3$  или килограммах). Количество жидкости с равной степенью точности может быть измерено и объемным, и массовым методами, количество газа - только объемным. Для твердых и сыпучих материалов используется понятие насыпной или объемной массы, которая зависит от гранулометрического состава сыпучего материала. Для более точных измерений количество

сыпучего материала определяется взвешиванием.

**Расходом вещества** называется количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени. Массовый расход измеряется в кг/с, объемный - в м<sup>3</sup>/с.

Приборы, измеряющие расход, называются *расходомерами*. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами-счетчиками. Такие приборы позволяют измерять расход и количество вещества.

В общем объеме измерительных операций в нефтепереработке, нефтехимии и газовой промышленности измерение уровня составляет 18 - 20 %.

Под **измерением уровня** понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной поверхности, принятой за начало отсчета. Приборы, выполняющие эту задачу, называются **уровнемерами**.

Методы измерения уровня: 1) поплавковый, 2) буйковый, 3) гидростатический, электрические и др.

**Исполнительным устройством** (ИУ) называется устройство в системе управления, непосредственно реализующее управляющее воздействие со стороны регулятора на объект управления путем механического перемещения **регулирующего органа** (РО) объекта.

Большинство управляющих воздействий в нефтепереработке и нефтехимии реализуется путем изменения расходов веществ (например, сырья, топлива, кубового остатка колонны и т.д.).

## 7 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Материал этого раздела приводится в сокращенном варианте для использования в разделе 8. Более подробно вопросы отображения чертежей и документов, связанных с оформлением схем автоматизации приводятся в девятом разделе.

### 7.1 Условные обозначения

Все измерительные и преобразовательные приборы, установленные на технологическом объекте, изображаются на функциональных схемах автоматизации (ФСА) в виде окружностей (рис. 59 а, б).

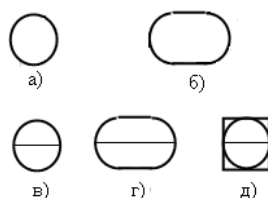


Рисунок 59 – Изображение приборов на ФСА

Если приборы размещаются на щитах и пультах в центральных или местных операторных помещениях, то внутри окружности проводится горизонтальная разделительная линия (рис. 59 в, г). Если функция, которой соответствует окружность, реализована в системе распределенного управления (например, в компьютеризированной системе), то окружность вписывается в квадрат (рис. 59 д).

Внутри окружности вписываются:

- в верхнюю часть - функциональное обозначение (обозначения контролируемых, сигнализируемых или регулируемых параметров, обозначение функций и функциональных признаков приборов и устройств);
- в нижнюю - позиционные обозначения приборов и устройств.

Места расположения отборных устройств и точек измерения указываются с помощью тонких сплошных линий. Буквенные обозначения средств автоматизации строятся на основе латинского алфавита и состоят из трех групп букв:

**1 буква** - Контролируемый, сигнализируемый или регулируемый параметр:

**D** - плотность,

**E** - любая электрическая величина,

**F** - расход,  
**H** - ручное воздействие,  
**L** - уровень,  
**P** - давление,  
**Q** - состав смеси, концентрация,  
**T** - температура,  
**U** - разнородные величины,  
**V** - вязкость,  
**W** – масса.

**2 буква** (необязательная) - уточнение характера измеряемой величины:

**D** - разность, перепад,  
**F** - соотношение,  
**J** - автоматическое переключение,  
**Q** - суммирование, интегрирование.

**3 группа символов** (несколько букв) - функции и функциональные признаки прибора:

**I** - показания,  
**R** - регистрация,  
**C** - регулирование,  
**S** - переключение,  
**Y** - преобразование сигналов,  
**A** - сигнализация,

Дополнительные условные обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств приведены ниже.

Букву **S** не следует применять для обозначения функции регулирования (в том числе позиционного).

Буква **E** применяется для обозначения чувствительных элементов, т. е. устройств, выполняющих первичное преобразование, например, термометров термоэлектрических (термопар), термометров сопротивления, сужающих устройств расходомеров.

Буква **T** обозначает промежуточное преобразование — дистанционную передачу сигнала. Ее рекомендуется применять для обозначения приборов с дистанционной передачей показаний, например, бесшкальных манометров (дифманометров), манометрических термометров с дистанционной передачей и других подобных приборов.

Буква **K** применяется для обозначения приборов, имеющих станцию



управления, т. е. переключатель для выбора вида управления (автоматическое, ручное) и устройство для дистанционного управления.

Буква **У** рекомендуется для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств. Порядок построения условных обозначений с применением дополнительных букв следующий: на первом месте ставится буква, обозначающая измеряемую величину; на втором— одна.

Буква **У** может быть использована для обозначения прибора, измеряющего несколько разнородных величин. Расшифровка этих величин приводится около прибора или на поле чертежа. Для конкретизации измеряемой величины около изображения прибора (справа от него) необходимо указывать наименование или символ измеряемой величины, например, «Напряжение», «Ток», рН, O<sub>2</sub> и т.д.

Для обозначения величин, не предусмотренных данным стандартом, могут быть использованы резервные буквы **В, N, O**; при этом многократно применяемые величины следует обозначать одной и той же резервной буквой. Резервные буквенные обозначения должны быть расшифрованы на схеме. Вводной и той же документации не допускается применение одной резервной буквы для обозначения разных величин.

Дополнительные условные обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств:


**В** зависимости от рода используемой энергии сигнала:


**Е** –электрический, **Р** – пневматический, **G** – гидравлический;


От формы сигнала: **A** – аналоговый, **D** – дискретный;

Математические функции: **K<sup>x</sup>x** –умножение на **K**, **x** – перемножение сигналов,  $\sqrt{\quad}$  - извлечение корня, **dt** – дифференцирование, **lg** – логарифм.

**Условные обозначения других приборов, используемых на схемах:**


-  -исполнительный механизм (общее обозначение). Положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала не регламентируется;


-  исполнительный механизм, открывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала;

-  исполнительный механизм, закрывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала;


-  исполнительный механизм, оставляющий регулирующий орган в


неизменном положении при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала;


-  исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом (обозначение может применяться в сочетании с любым из дополнительных знаков, характеризующих положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала);


-  автоматическая защита из системы противоаварийной защиты (ПАЗ);


-  технологическое отключение (включение) из системы управления;

-  регулирующий орган (задвижка, клапан и т.д.);

-  регулирующий клапан, открывающийся при прекращении подачи воздуха (нормально открытый);


-  регулирующий клапан, закрывающийся при прекращении подачи воздуха (нормально закрытый);


-  управляющий электропневматический клапан;


-  отсекающий с приводом (запорный клапан);

-  электрозадвижка;


Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации:


 - Первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленный по месту (термоэлектрический преобразователь (термопара), и т.д.).

 - Прибор для измерения температуры показывающий (термометры ртутный, манометрический и т.д.).

 - Прибор для измерения температуры бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту. (Преобразователь термоЭДС в стандартный токовый сигнал 0...5 мА, гр. ХА,

марка Ш-72).

 - Прибор для измерения температуры одноточечный регистрирующий, установленный на щите.

 - Прибор для измерения температуры с автоматическим обегаяющим устройством регистрирующий, установленный на щите (термометр манометрический, милливольтметр, потенциометр, мост и т.д.).

## 7.2 Основные принципы построения функциональных схем автоматизации (ФСА)

ФСА представляют собой технологическую схему с нанесенными на нее обозначениями контрольно-измерительных приборов. Технологическое оборудование чертится обычными линиями, контрольно-измерительное – тонкими.

При этом первичные преобразователи (датчики) ХЕ (для упрощения буквой Х обозначен произвольный технологический параметр; вместо него может быть любое обозначение из принятых: температура Т, расход F и т.д.), показывающие приборы, установленные по месту XI (TI, LI, FQI, PI и т.д.) и исполнительные устройства (клапаны, задвижки и др.) показываются непосредственно на схеме. Прочие приборы сносятся в таблицу, которая расположена ниже схемы и имеет как минимум две строки, обозначенных «По месту» и «На щите».

Существует несколько наиболее распространенных вариантов построения ФСА, показанных на рисунке 60.

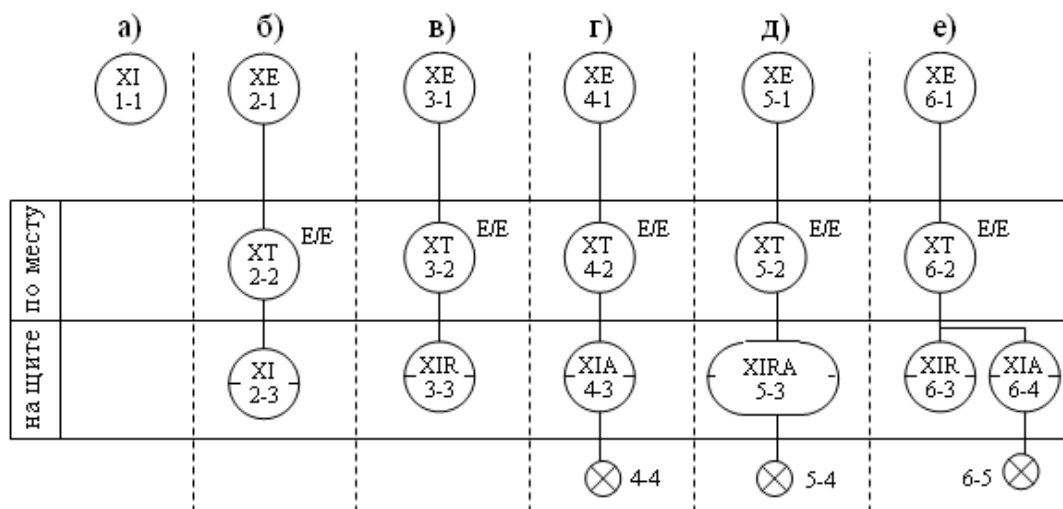


Рисунок 60 - варианты построения ФСА

**Вариант 1.** Измерение и индикация технологического параметра по месту (XI). (рис. 60 а).

**Вариант 2.** Измерение с индикацией на щите оператора (XI, рис. 60 б).

Датчик измеряет технологический параметр, преобразует его в какой-либо сигнал, удобный для дальнейшей передачи и передает его вторичному преобразователю. Вторичный преобразователь усиливает этот сигнал, преобразует его в один из унифицированных сигналов и передает далее.

**Вариант 3.** Измерение с индикацией и регистрацией (XIR или XR, рис. 60 в). Принцип действия схемы аналогичен предыдущему варианту, но вместо показывающего прибора на щите устанавливается регистрирующий.

**Вариант 4.** Сигнализация технологического параметра (XIA, рис. 60, г). Существуют показывающие приборы, которые позволяют сигнализировать звуковым или световым сигналом факт выхода контролируемого параметра за допустимые пределы..

**Вариант 5.** Измерение с индикацией, регистрацией и сигнализацией на щите (рис. 60 д и е).

## 8 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Несмотря на огромное разнообразие технологических процессов химической промышленности, все они состоят из отдельных технологических операций, каждую из которых можно отнести к одной из следующих групп типовых процессов:

1. механические,
2. гидродинамические,
3. тепловые,
4. массообменные,
5. химические (реакторные),
6. термодинамические.

В основе процессов каждой группы лежат общие физико-химические закономерности, что предопределяет значительное сходство их свойств как объектов автоматизации. Благодаря этому оказывается возможной разработка типовых схем автоматизации для объектов каждой группы.

Однако, одного технологического признака недостаточно для типизации объектов автоматизации, т.к. процессы одной группы могут иметь различное аппаратное оформление (например, сушка в барабанной сушилке или в сушилке с кипящим слоем) и, как объекты автоматизации, существенно различаться по своим свойствам.

Следовательно, только сочетание двух признаков - типа технологического процесса и типа аппарата, в котором этот процесс осуществляется, полностью определяет типовой объект автоматического регулирования в химическом производстве.

Для каждого типового объекта можно разработать один или несколько вариантов систем автоматизации.

### 8.1 Типовые САР с гидродинамическими объектами

К ним относятся системы автоматического регулирования: **расхода, уровня, давления, смещения.**

. Чаще всего возникает задача регулирования расхода газа, жидкости или пара, транспортируемого по трубопроводу. Регулирование расхода в такой системе производится путем дросселирования потока, которое зависит от степени открытия регулирующего клапана (рис. 61).

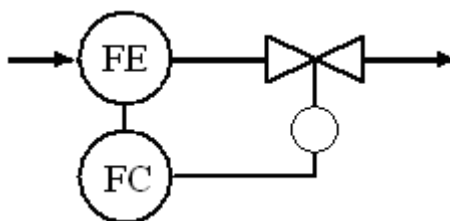


Рисунок 61 - Дросселирование потока

Объектом регулирования фактически является участок трубопровода между датчиком расхода и регулирующим клапаном, который можно считать безынерционным усилительным звеном. Следовательно, динамическая характеристика заданной части САР определяется только динамическими свойствами датчика расхода и регулирующего органа. Для поддержания заданной величины расхода без остаточного отклонения в САР расхода обычно применяются ПИ-регуляторы.

**АСР давления** жидкости, газа или пара, транспортируемого по трубопроводу имеет много общего с САР расхода (рис. 62), т.к. объекты регулирования обладают одинаковыми свойствами. Иногда для регулирования давления в трубопроводах пара или сжатого воздуха применяют П-регуляторы прямого действия.

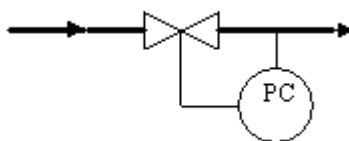


Рисунок 62 - АСР давления

При отсутствии резких и значительных по амплитуде возмущений они обеспечивают хорошее качество регулирования благодаря минимальной инерционности контура регулирования.

#### **Регулирование расхода методом дросселирования потока в байпасном трубопроводе**

При использовании поршневых насосов регулирующие органы нельзя устанавливать на напорном трубопроводе, т.к. изменение степени открытия такого органа приводит лишь к изменению давления в нагнетательной линии, расход же остается постоянным. Полное закрытие регулирующего органа может привести к поломке насоса. В таком случае регулирующий орган устанавливается на байпасной линии, соединяющей всасывающий и нагнетательный трубопроводы (рис. 63).

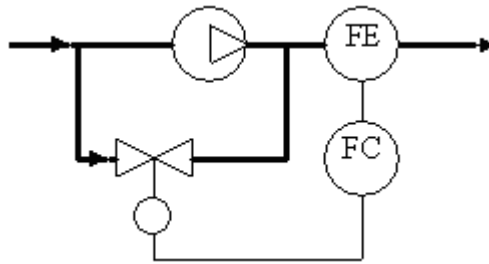


Рисунок 63 - Регулирование расхода методом дросселирования потока в байпасном трубопроводе

Недостатком данного способа регулирования является низкая экономичность. Более экономичным является метод регулирования изменением **числа оборотов вала**. Число оборотов вала можно изменить:

1. переключением обмотки статора на различное число пар полюсов,
2. введением реостата в цепь ротора двигателя,
3. изменением частоты питающего тока,
4. применяя регулируемые муфты скольжения между насосом и асинхронным двигателем.

#### *Смешение жидкостей*

При разработке типового решения под объектом управления будем понимать емкость с механической мешалкой, в которой смешиваются две жидкости. Цель управления - получение жидкости (смеси) с определенной концентрацией какого-либо компонента.

Расходы жидкостей А и Б и их концентрации могут изменяться при нарушении технологического режима предыдущих процессов. Расход смеси определяется последующим технологическим процессом.

Требуется при проведении процесса смешения:

1. поддерживать материальный баланс смесителя, т.е.  $F_A + F_B = F_{\text{смеси}}$ .
2. поддерживать постоянной концентрацию смеси, т.е.  $Q_{\text{смеси}} = \text{const}$ .

Для поддержания материального баланса следует в качестве регулируемой величины выбрать уровень смеси в баке (рис. 64). Постоянство уровня достигается изменением расхода  $F_B$ . Постоянство концентрации  $Q_{\text{смеси}}$  может быть при этом обеспечено изменением расхода  $F_A$ .

Если расход жидкости Б сильно изменяется при регулировании уровня, для улучшения качества регулирования концентрации следует использовать регулятор соотношения расходов жидкостей с коррекцией по концентрации (рис. 65). Этот регулятор способствует уменьшению возмущений по концентрации, поступающих при первоначальном изменении расхода жидкости.

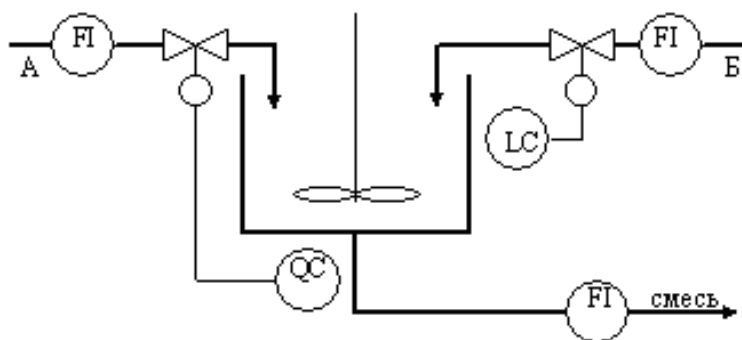


Рисунок 64 – Регулирование смешения жидкостей

При поступлении других возмущающих воздействий, например, с изменением концентрации компонентов в жидкостях, изменится задание соотношения расходов.

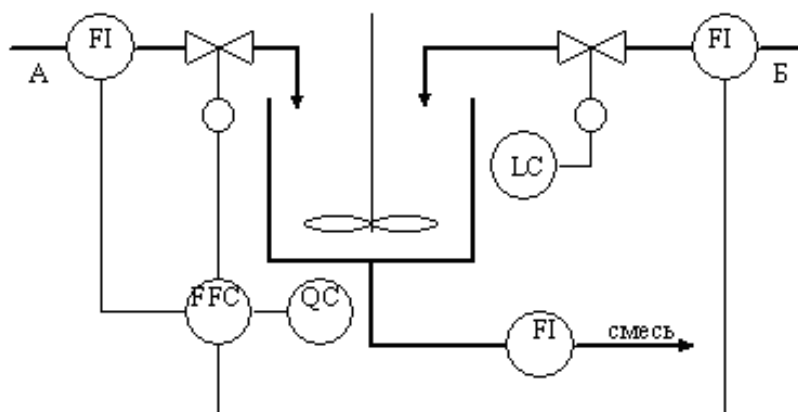


Рисунок 65 – Регулирование смешения жидкостей с коррекцией по концентрации

## 8.2 Автоматизация тепловых процессов

Тепловые эффекты часто составляют основу технологических процессов. В связи с этим, вопросы автоматизации теплообменников, трубчатых печей, выпарных аппаратов и других объектов, связанных с передачей тепла, играют существенную роль.

Различают теплообменники: непосредственного смешения, поверхностные. В поверхностных теплообменниках теплопередача может протекать: 1. без изменения агрегатного состояния теплоносителей (нагреватели, холодильники), 2. с изменением агрегатного состояния (испарители, конденсаторы).

**Регулирование теплообменников смешения** заключается в поддержании постоянства температуры суммарного потока на выходе



теплообменника (рис. 66). Входными величинами являются расходы жидкостей на входе и их температуры. Температуру суммарного потока обычно стабилизируют посредством изменения расхода одного из входных потоков. Теплообменники обладают малым запаздыванием и значительным самовыравниванием.

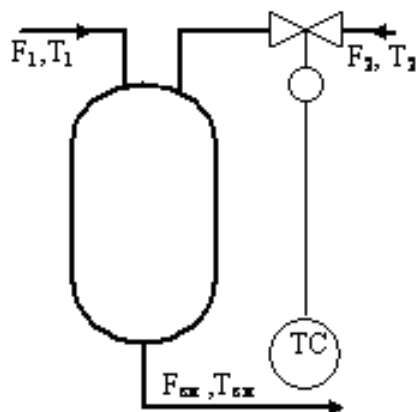


Рисунок 66 - Регулирование теплообменника смешения

**Регулирование поверхностных теплообменников** заключается в поддержании постоянства температуры одного из теплоносителей на выходе из теплообменника.

Процесс теплопередачи зависит от величин расходов продукта и греющего агента, изменения их удельных теплоемкостей, начальных температур, коэффициента теплопередачи, поверхности теплообмена. Коэффициент теплопередачи меняется незначительно и его можно считать величиной постоянной. Площадь теплообмена - величина постоянная. Таким образом возмущающими воздействиями будут изменения: **расхода продукта, удельных теплоемкостей, начальной температуры продукта.**

В качестве регулирующего воздействия выбирается изменение расхода греющего агента (рис. 66).

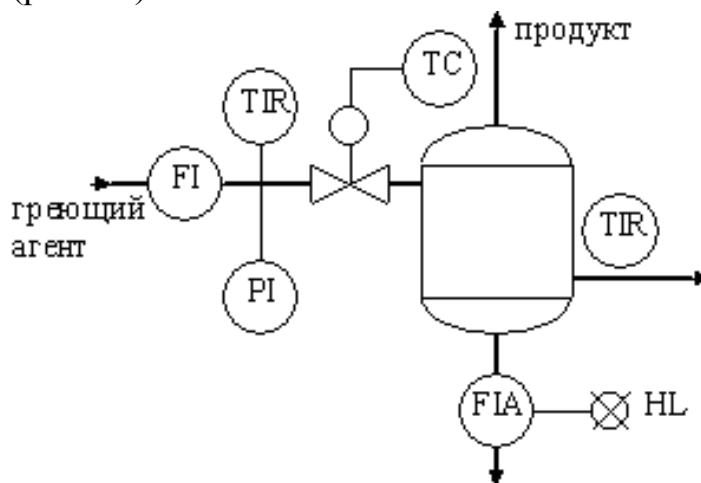


Рисунок 66 - Регулирование поверхностных теплообменников

Как объекты регулирования температуры теплообменники обладают большими запаздываниями, поэтому следует тщательно выбирать место установки датчика и закона регулирования. Знание начальных и конечных температур, расходов требуется для наладки и нормальной эксплуатации процесса. Прекращение подачи продукта может быть причиной выхода из строя теплообменника, поэтому отсутствие расхода продукта подлежит сигнализации.

При изменениях давления греющего агента (пара) меняется количество агента, поступающего в теплообменник, чем вносятся сильные возмущающие воздействия. Чтобы исключить их, используют регулятор давления в питающем коллекторе или двухконтурную САР (рис. 67).

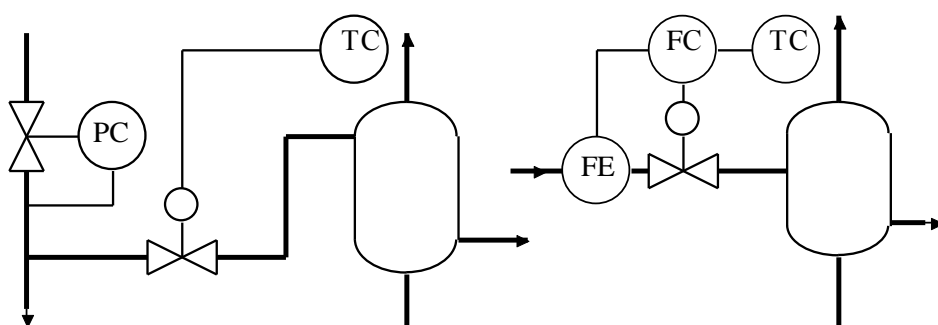


Рисунок 67 - Регулирование поверхностных теплообменников с компенсацией возмущений

Если по условиям технологии не допускается изменение потоков теплоносителей, то температуру продукта регулируют путем байпасирования части продукта (рис. 68).

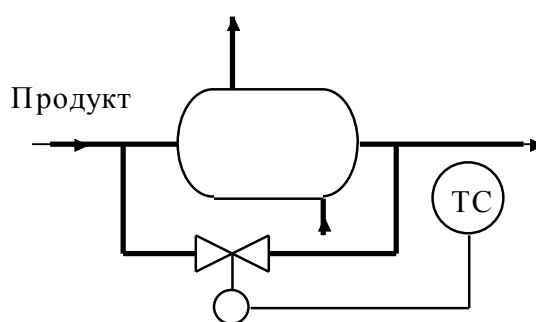


Рисунок 68 – Регулирование температуры путем байпасирования части продукта

Такая схема позволяет улучшить динамические характеристики системы регулирования, вследствие уменьшения времени запаздывания объекта. Недостатком является больший расход теплоносителя (для перегрева продукта).

### Автоматизация трубчатых печей

Прокачиваемый через змеевик трубчатой печи продукт нагревается за счет тепла, образующегося при сжигании топливного газа.

Цель регулирования трубчатых печей - поддержание постоянства температуры продукта на выходе из печи.

Возмущениями являются: расход и температура исходного продукта; теплотворная способность топлива; расход и температура воздуха, подаваемого для сжигания топлива; потери тепла в окружающую среду.

Вследствие большого запаздывания по передаче тепла от дымовых газов через стенку змеевика к продукту одноконтурная система регулирования не обеспечивает хорошего качества регулирования (большие динамическая ошибка и время регулирования). Лучшими показателями качества регулирования обладает каскадная система (рис. 69).

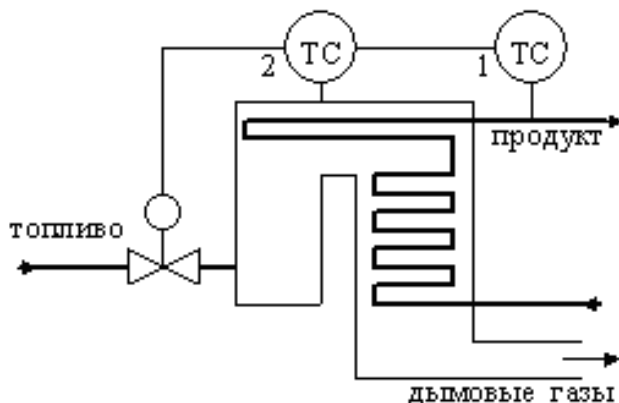


Рисунок 69 – Каскадная система регулирования температуры

1-корректирующий регулятор (основной) температуры выхода продукта из печи.

2-регулятор (вспомогательный) стабилизирующий температуру газов над перевальной стенкой печи.

Стабилизирующий регулятор начинает компенсировать возмущения, влияющие на процесс сгорания топлива, прежде чем они приведут к изменению температуры продукта.

При резких изменениях нагрузки печи и наличии возмущений по расходу топлива применяют схему с регулятором соотношений расходов продукта и топлива (рис. 70).

Если теплотворная способность топлива меняется, то используется корректирующий сигнал на регулятор соотношения от регулятора содержания кислорода в топочных газах.

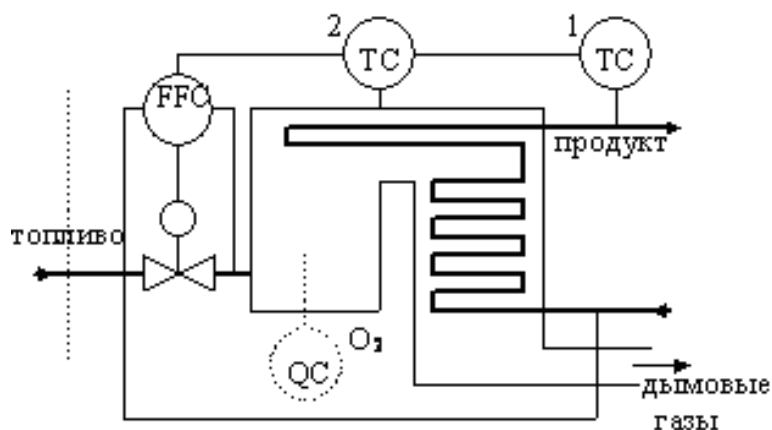


Рисунок 70 – Каскадная система регулирования температуры с регулятором соотношений расходов продукта и топлива

### Выпаривание

Основные принципы управления процессом выпаривания рассмотрим на примере однокорпусной выпарной установки естественной циркуляции с выносным кипятильником (рис. 71).

Цель управления - поддержание определенного значения концентрации вещества в упаренном растворе.

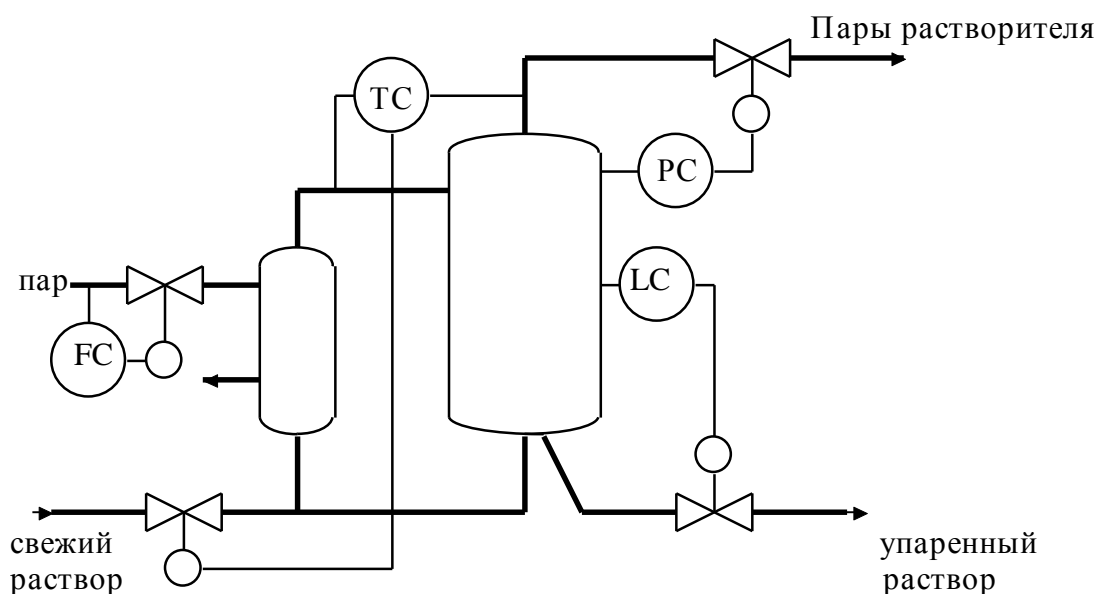


Рисунок 71 – Автоматизация процесса выпаривания

Основные возмущающие воздействия: изменение концентрации свежего раствора, колебания расхода раствора, изменение расхода теплоносителя.

Анализ объекта регулирования показывает, что цель управления может быть достигнута путем регулирования расхода свежего раствора в зависимости от концентрации упаренного раствора. Причем концентрация

упаренного раствора измеряется по разности между температурами кипения раствора и растворителя (температурной депрессии). (Регулятор ТС).

Дополнительно следует регулировать давление паров растворителя, уровень упаренного раствора и расход теплоносителя. При этом давление однозначно связано с температурой паров растворителя. Стабилизация уровня позволяет выполнить требование поддержания материального баланса. Возмущающее воздействие со стороны расхода теплоносителя компенсируется стабилизацией его (контур FC).

### 8.3 Автоматизация массообменных процессов

Массообменные процессы применяются с целью разделения смеси веществ или получения целевого продукта заданного состава путем перевода одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую.

Основной регулируемой величиной в таких процессах является концентрация определенного компонента в получаемом продукте (или содержание примесей).

Интенсивность протекания массообменных процессов зависит от гидродинамического режима потоков веществ в технологических аппаратах, а также от тепло- и массообмена между этими потоками.

Как правило, аппараты, в которых протекают процессы, характеризуются большой инерционностью и запаздыванием. К массообменным процессам относятся: **абсорбция, адсорбция, ректификация, экстракция, сушка.**

#### Автоматизация процесса абсорбции (рис. 72)

Целью управления является поддержание постоянства заданной концентрации извлекаемого компонента в обедненном газе, а также соблюдение материального и теплового баланса.

Основными возмущающими воздействиями являются: расход газовой среды, начальная концентрация компонента.

Регулирующими воздействиями являются: расход свежего абсорбента, расход обедненного газа, расход насыщенного абсорбента.

Компенсация изменения расхода исходного насыщенного газа обеспечивается путем использования регулятора соотношения расходов этого газа и свежего абсорбента, выходной сигнал которого управляет подачей абсорбента.

При переменной концентрации извлекаемого компонента в исходной

смеси дополнительно предусматривают корректировку соотношения расходов насыщающего газа и исходного абсорбента с помощью регулятора концентрации извлекаемого компонента в газовой смеси  $QC_1$ .

Задание же этому регулятору обеспечивает регулятор концентрации извлекаемого компонента в обедненном газе  $QC_2$ .

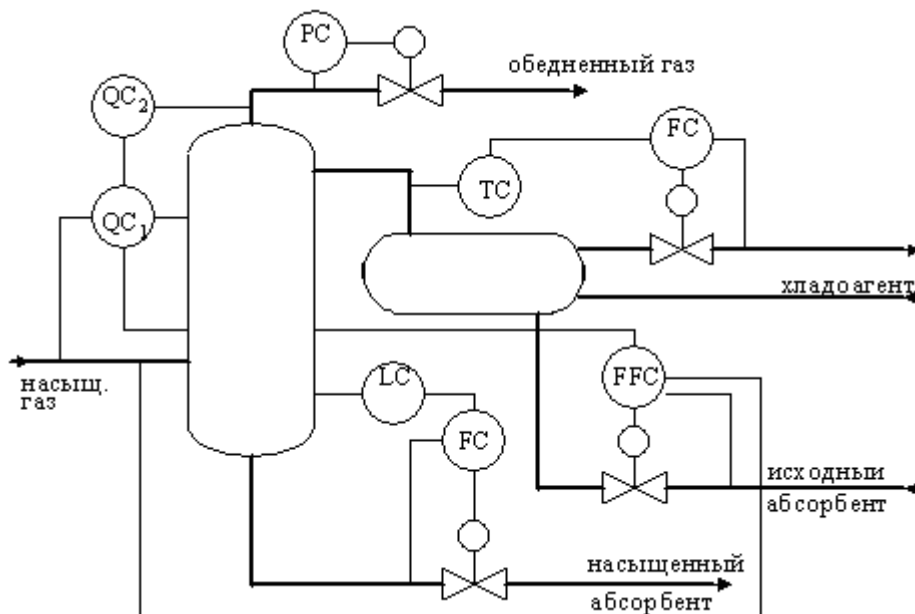


Рисунок 72 - Автоматизация процесса абсорбции

Насыщенный абсорбент, отбираемый из куба абсорбера направляют на десорбцию. Поэтому вполне достаточно обеспечивать равномерную подачу насыщенного абсорбента в десорбер и одновременно поддерживать постоянство уровня в кубе абсорбера. Для этого применяют двухконтурную каскадную систему регулирования (LC, FC), воздействующую на расход отводимого из абсорбера кубового продукта. Стабилизирующим в этой системе является регулятор расхода, а корректирующим - регулятор уровня в кубе.

Возмущения по расходу хладагента компенсируются с помощью каскадной системы регулирования расхода хладагента с корректировкой по температуре охлажденного абсорбента.

Давление (оно способствует извлечению ценных компонентов из газовой среды) стабилизируется регулятором давления на линии обедненного газа.

### **Автоматизация процесса ректификации**

Задача управления процессом состоит в получении целевого продукта заданного состава при установленной производительности установки и минимальных затратах теплоагентов.

Исходная смесь нагревается в теплообменнике 1 до температуры кипения и поступает в ректификационную колонну 3 на тарелку питания. Находящаяся в кубе колонны жидкость испаряется в выносном кипятильнике 2 и в виде паровой фазы проходит вверх по колонне.

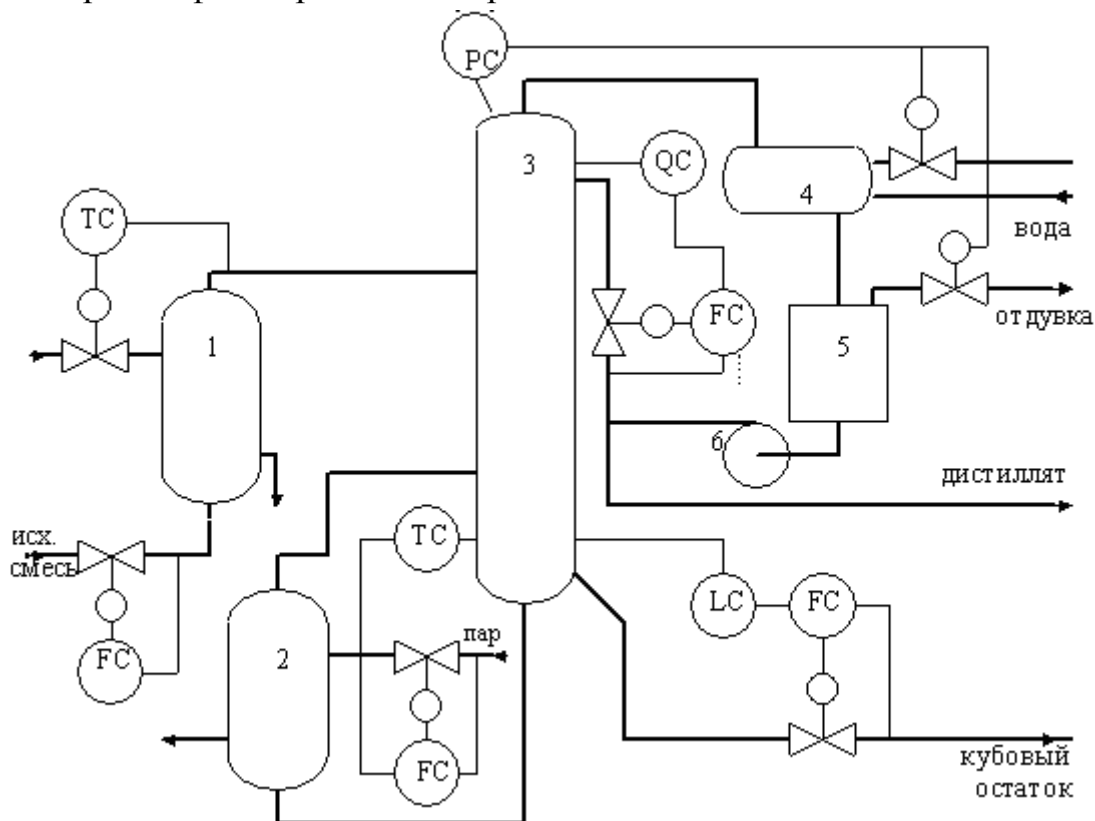


Рисунок 73 - Автоматизация процесса ректификации

Паровой поток, выходя из колонны, попадает в дефлегматор 4, охлаждаемый водой. Образовавшаяся жидкая фаза стекает в флегмовую емкость 5, откуда насосом подается в верхнюю часть колонны на орошение в виде флегмы и частично отводится с установки в виде дистиллята. Часть кубового продукта, называемого остатком, отводится с установки. Целевыми продуктами установки могут быть дистиллят или кубовый остаток.

Основными регулируемыми технологическими величинами являются составы дистиллята или кубового остатка.

Возмущающими воздействиями являются: состав, расход, температура исходной смеси; параметры тепло и хладоагента; давление в колонне и другие величины.

Управляющие воздействия: расходы флегмы в колонну и теплоносителя в кипятильник. Причем расход флегмы в основном влияет на состав дистиллята, а расход греющего пара -на состав кубового остатка.

Колебания расхода исходной смеси (наиболее сильное возмущение) компенсируется АСР расхода. Исходная смесь подается при температуре

кипения (поддерживается АСР температуры).

Гидравлическое сопротивление колонны почти не изменяется. Поэтому давление достаточно стабилизировать в одном месте (в верхней части колонны). Давление регулируют расходом хладагента в дефлегматор и изменением гидравлического сопротивления на линии отдувки.

Для реализации управляющего воздействия (расход флегмы) применяют каскадную схему, в которой регулятор состава дистиллята вырабатывает корректирующий сигнал, направляемый в качестве задания регулятору расхода флегмы.

Для подачи греющего пара в кипятильник применяют систему регулирования расхода, задание которой изменяет регулятор температуры на контрольной тарелке отгонной части колонны.

При дальнейшем разделении кубового остатка необходимо одновременно обеспечить постоянство его уровня в кубе и постоянство подачи на следующую по технологической линии установку. Для этой цели используется АСР расхода со стабилизирующим регулятором, задание которому корректируется регулятором уровня продукта в кубе колонны.

В случае, когда невозможно стабилизировать расход исходной смеси, то в контуры АСР составов дистиллята (кубового остатка) вводят дополнительные контуры по возмущению, учитывающих изменение расхода исходной смеси (пунктир на схеме).

#### **Автоматизация процесса сушки (рис. 74)**

Сушка - тепловой процесс обезвоживания твердых материалов путем испарения влаги и отвода образующихся паров. Продолжительность процесса сушки определяется временем, необходимым для понижения влагосодержания материала от начального значения  $M_n$  до конечного  $M_k$ .

Цель управления заключается в обеспечении высушивания поступающего влажного твердого материала до заданного влагосодержания при определенной производительности по влажному материалу.

Основными возмущениями являются:

1. изменение расхода, начальной влажности, дисперсного состояния твердого материала,
2. изменение расхода и начальной температуры теплоносителя.

Основная регулируемая величина - остаточная влажность твердого материала. Однако, вследствие отсутствия надежных измерительных преобразователей остаточной влажности твердого материала, при автоматизации процесса в качестве регулируемых величин используют



температуры или влажность сушильного агента.

Процесс сушки реализуется либо в барабанных сушилках, либо в сушилках с псевдоожиженным слоем.

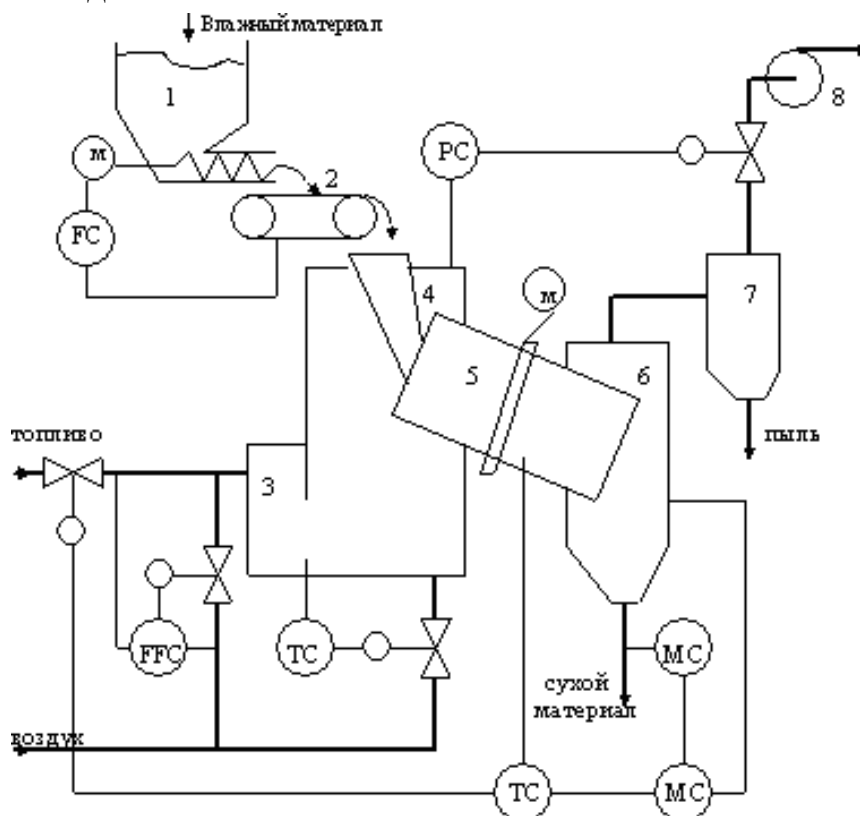


Рисунок 74 - Автоматизация барабанной сушиллки:

1-бункер, 2-дозатор, 3-топка, 4-смесительная камера, 5-сушильный барабан, 6-бункер сухого материала, 7-циклон, 8- вентилятор

Процесс сушки обычно регулируют по влажности теплоносителя на выходе из барабана. Вследствие большого запаздывания в объекте качественное регулирование может быть обеспечено только с помощью многоконтурных систем. Например, подачей топливного газа управляет каскадная система регулирования температуры воздуха в барабане (стабилизирующий регулятор) с корректировкой по влажности воздуха на выходе из сушиллки (корректирующий регулятор). При наличии надежного измерительного преобразователя остаточной влажности высушиваемого материала возможно введение в данную систему еще одного контура с регулятором влажности твердого материала, выходной сигнал которого в качестве задания направляют на регулятор влажности сушильного агента.

Для повышения чувствительности АСР температуры воздуха датчик температуры (обычно термопара) устанавливают в пределах первой трети длины барабана (т.к. здесь температура теплоносителя изменяется более интенсивно).

Стабилизацию расхода влажного материала обеспечивает стабилизирующий регулятор расхода (FC).

Полнота сгорания топлива обеспечивается АСР соотношения расходов газа и воздуха, обеспечивающей подачу первичного воздуха в топку.

Требуемая температура воздуха на входе в барабан обеспечивается стабилизирующим регулятором температуры, воздействующим на подачу вторичного воздуха в камеру смешения.

Нагрузка объекта по сушильному агенту (воздуху) поддерживается на постоянном значении регулятором разрежения воздуха в смесительной камере, воздействующим на клапан, установленный на линии отвода воздуха после циклона.

Контролю и регистрации подлежат расходы топливного газа и вторичного воздуха, а также разрежение и температура в бункере сухого материала.

## **9 ПОЯСНЕНИЯ К ГОСТ 21.404-85 ПО РАЗРАБОТКЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ**

### **9.1 Основные положения разработки схемы автоматизации (СА)**

При создании системы автоматизации технологического процесса одним из основных проектных документов является функциональная схема автоматизации (СА). Выполнение СА требует знакомства с рядом ГОСТов и руководящих материалов.

Функциональная схема представляет собой чертеж, выполненный в соответствии с ГОСТ 21.404-85, на котором с помощью условных обозначений изображаются основное технологическое оборудование, коммуникации, исполнительные устройства и средства контроля и управления. На основании СА выполняются остальные чертежи проекта и составляются заказные ведомости и заказные спецификации приборов и средств автоматизации.

СА является техническим документом, который определяет функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, регулирования, управления и оснащения объекта управления приборами, средствами автоматизации и вычислительной техники. Создание СА предопределяет необходимость глубокого изучения технологического процесса.

Проектирование СА базируется на ряде принципов.

> Уровень автоматизации технологических процессов должен определяться не только целесообразностью внедрения определенных комплексов технических средств, но и перспективами модернизации и дальнейшего развития, как технологии, так и технических средств автоматизации.

На сегодняшний момент наблюдается тенденция к переходу от аппаратных регуляторов, агрегатных и модульных комплексов (АКЭСР, «СТАРТ») к промышленным программируемым микропроцессорным контроллерам, а также от представления информации с помощью показывающих, регистрирующих приборов к промышленным ЭВМ со SCADA пакетами, выполняющим дополнительно задачи диагностики, оперативного управления и т.п.

> При разработке схем автоматизации в процессе выбора элементов комплекса технических средств должны учитываться:

- а) особенности технологического процесса и его свойства как технологического объекта управления;
- б) условия пожаро- и взрывоопасности, агрессивность и токсичность перерабатываемых продуктов, их параметры и области допустимых изменений;
- в) расстояния от мест установки преобразователей и вспомогательных устройств, исполнительных механизмов, приводов машин и запорных органов до пунктов управления и контроля;
- г) требуемая точность и быстродействие средств автоматизации;
- д) массивы перерабатываемой информации и число сигналов управления.

Схемы автоматизации технологических процессов должны строиться на базе серийно выпускаемых технических средств. При этом необходимо стремиться к применению однотипных и предпочтительно унифицированных блочно-модульных систем или программно-технических комплексов. В случае отсутствия требуемого прибора в составе серийно выпускаемой аппаратуры составляется техническое задание на разработку нового технического средства автоматизации. При этом в спецификации вместо марки (типа) прибора указывается - «спецразработка».

Выбор технических средств, для АСР производится в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 75, где даны следующие обозначения функциональных блоков: ПП - первичный преобразователь; ВП - промежуточный (вторичный преобразователь) преобразователь; ИП - измерительный прибор; Зд – задатчик; ИМ - исполнительный механизм; РО - регулирующий орган.

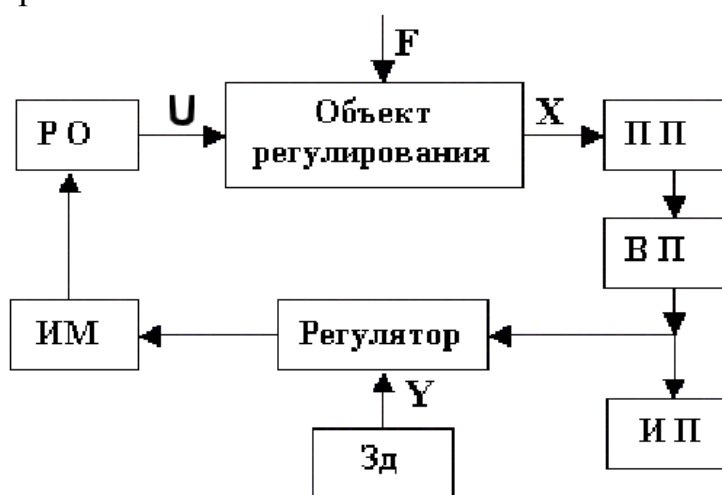


Рисунок 75 - Структурная схема АСР

При выборе технических средств конкретной марки необходимо

учитывать, что некоторые технические средства могут сочетать в своем комплекте несколько функциональных блоков.

Выбор рода энергии измерительных и управляющих сигналов и соответствующих технических средств производится на основе анализа условий пожаро- и взрывоопасности технологического объекта управления, агрессивности среды, требований к быстродействию, дальности передачи сигналов информации и управления. Некоторые рекомендации даны в таблице 4. Взаимосвязь средств измерения, регистрации, регулирования обеспечивается за счет согласования входов и выходов приборов, что наиболее целесообразно реализовать, если приборы имеют унифицированные входные/выходные сигналы.

Таблица 4 - Рекомендации по выбору ветви ГСП при разработке СА

Характеристики	Ветви ГСП	
	Электрическая	Пневматическая
<i>Максимальная длина канал связи:</i>		
- до 300 м	любой унифицированный сигнал	
- до 10 км	пост. ток и частота	-
- более 10 км	кодированный сигнал	-
<i>Быстродействие</i>		- запаздывание в передачи сигнала; - время срабатывания $-0,01c < 0,1c$
<i>Условия применения</i>	- невзрыво- и пожароопасные процессы (иначе взрывобезопасное исполнение приборов); - большие расстояния от объекта до операторского помещения (до 20 км); - код: помехоустойчивость	- пожаро- и взрывобезопасность; - высокие температуры; - при магнитных и радиационных помехах; - относительная дешевизна; - простота обслуживания

> Количество приборов, аппаратуры управления и сигнализации, устанавливаемых на щитах и рабочих станциях, должно быть по возможности минимально, например, посредством использования многоканальных промежуточных преобразователей, многофункциональных приборов и т.д.

Результатом составления СА является:

- 1) выбор методов измерения технологических параметров;
- 2) выбор основных технологических средств, наиболее полно отвечающих предъявленным требованиям и условиям работы объекта;
- 3) определение энергии приводов исполнительных механизмов, регулирующих и запорных органов технологического оборудования, управляемого автоматически или дистанционно;

4) размещение средств автоматизации на щитах управления, технологических объектах и трубопроводах, и определение способа представления информации о состоянии технологического оборудования.

## 9.2 Оформление чертежей ФСА

### 9.2.1 Правила изображения технологического оборудования и коммуникаций на технологических схемах

> Графическое построение технологической схемы должно давать наглядное представление о последовательности технологического процесса. На технологической схеме обычно показывается только то оборудование и те коммуникации, для которых разрабатывается ФСА. На трубопроводах обычно показывается та регулирующая и запорная аппаратура, которая непосредственно используется при контроле и управлении процессом.

> Технологическая схема изображается упрощенно (контурные линии агрегатов: 0,2 - 0,5 мм; коммуникаций трубопроводов: 0,5 - 1,5 мм), без соблюдения масштаба.

Соединение технологических трубопроводов обозначается точкой в узле соединения линий; отсутствие точки обозначает отсутствие соединения. Направление движения потоков указывается стрелками, оформленными в виде равносторонних треугольников со стороной 5 мм, пример приведен на рисунке 76.



Рисунок 76 - Изображение направления движения потоков

> На линиях обрыва ставятся стрелки и даются необходимые пояснения (рис. 77) .



Рисунок 77 - Выполнение пояснений на линиях обрыва

Маркировка трубопроводов выполняется в соответствии с ГОСТ 3464-63 цифровыми индексами, которые проставляются равномерно через 50 – 60 мм в разрывах условной линии магистрали. Список веществ и соответствующие им по ГОСТу цифровые индексы приведен в таблице 5.

Таблица 5 - Условные обозначения трубопроводов для жидкостей и газов согласно ГОСТ 3464-63

Содержимое Трубопроводов		Условное обозначение	Содержимое трубопроводов	Условное обозначение	
Вода		1	Жидкое горючее	15	
Пар		2	Газы	Водород	16
Воздух		3		Ацетон	17
Азот		4		Фреон	18
Кислород		5		Метан	19
Инертные газы	Аргон	6		Этан	20
	Неон	7		Этилен	21
	Гелий	8		Пропан	22
	Криптон	9		Пропилен	23
	Ксенон	10		Бутан	24
Аммиак		11		Бутилен	25
Кислота		12	Противопожарный трубопровод	26	
Щелочь		13	Трубопровод разряжением	под 27	
Масло		14	Другие продукты	28...	

Не упомянутым в ГОСТе продуктам присваивается порядковый номер, начиная с 28. Расшифровка новых обозначений дается в таблице, располагаемой в правом верхнем углу чертежа (от кромки листа).

Отдельным аппаратам, блокам, машинам, представленным на ФСА, присваиваются индивидуальные обозначения (предпочтительно буквенные), которые размещается возле или внутри изображения агрегата. Расшифровка вводимых обозначений дается в таблице, располагаемой в правом верхнем углу чертежа под таблицей условных обозначений трубопроводов. В пояснительных надписях на первое место ставится существительное в именительном падеже, далее - остальные поясняющие слова.

> В правом нижнем углу чертежа выполняется основная надпись согласно ГОСТ 2.104-68 выполняется штамп основной надписи.

### 9.2.2 Правила изображения технических средств автоматизации

Схемы автоматизации выполняют двумя основными способами - с упрощенным или развёрнутым изображением средств автоматизации.

При упрощенном способе построения на схемах автоматизации не обозначаются первичные измерительные преобразователи и вся

дополнительная и вспомогательная аппаратура автоматики. Основные функции контроля и управления отражают с помощью одного графического обозначения, которое располагают на поле чертежа вблизи места измерения параметра или нанесения управляющего воздействия.

При развернутом способе построения каждое средство измерения, прибор или блок на схеме автоматизации показывают в виде отдельного обозначения.

Методика построения графических условных изображений для упрощенного и развернутого способов является общей. ГОСТ 21.404-85 предусматривает систему построения графических и буквенных условных обозначений в зависимости от функций, выполняемых техническими средствами.

> Основные средства автоматизации выполняются на ФСА в виде условных графических изображений (табл.6) линиями толщиной 0,5-0,6 мм.

Таблица 6 - Условные графические изображения технических средств автоматизации согласно ГОСТ 21.404-85

Наименование	Обозначение
Первичные измерительные преобразователи, приборы, устанавливаемые по месту	
Приборы, устанавливаемые на щите (дистанционно)	
Исполнительный механизм	
Регулирующий орган	
Лампа накаливания	

Овал применяется вместо окружности в случаях, когда условное буквенное обозначение превышает 5 знаков или при большом числе знаков позиционного обозначения.

> Графические условные обозначения электроаппаратуры (гудки, сирены, электродвигатели и т.д.), а также буквенное обозначение элементов выполняются в соответствии с действующими стандартами ЕСКД [7].

> Вспомогательные элементы и дополнительные устройства (источники



питания, предохранители, стабилизаторы и т.п.) не влияющие на сущность действия системы автоматизации на схемах не показываются.

> Правила изображения линий связи между средствами автоматизации:

1) Линии изображаются однолинейными толщиной 0,2 - 0,3 мм.

2) Наносятся линии по возможно кратчайшему расстоянию с наименьшим количеством изгибов и пересечений. Допускается пересекать только линии связи технологической аппаратуры и коммуникаций. Расстояния между параллельными линиями связи - не менее 3 мм.

3) Подвод линий связи к символам средств автоматизации допускается сверху, сбоку, снизу. При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях связи наносят стрелки.

4) Слияние линий связи отмечается точкой и допускается только в случае функционального воздействия сигналов на соответствующие элементы цепи контроля, управления, блокировки.

5) В целях облегчения чтения схемы, линии связи, идущие от приборов, расположенных на схеме у оборудования, к другим приборам, расположенным по месту или на щите управления, разрывают. Обрывы желательно располагать на одном уровне, под изображением технологического оборудования. Маркировка обрывов осуществляется адресным способом строго по порядку со стороны прямоугольников "ПМ" и "ЩУ" слева направо.

6) Предельные рабочие (максимальное и минимальное) значения измеряемых или регулируемых величин в единицах Международной системы СИ указываются вдоль линий связи, идущих от прямоугольников к отборным устройствам и преобразователям.

> Отборные устройства для всех постоянно подключенных средств измерения специального обозначения не имеют, а изображаются линией связи, соединяющей технологическое оборудование или трубопровод с условным изображением первичного измерительного преобразователя. Для указания точного места расположения отборного устройства или точки измерения, в конце линии связи в точке отбора импульса изображается окружность диаметром 2 мм.

> Принципы построения буквенного условного обозначения функций автоматизации.

1) Буквенное условное обозначение размещается в верхней половине окружности или овала (рис. 78).

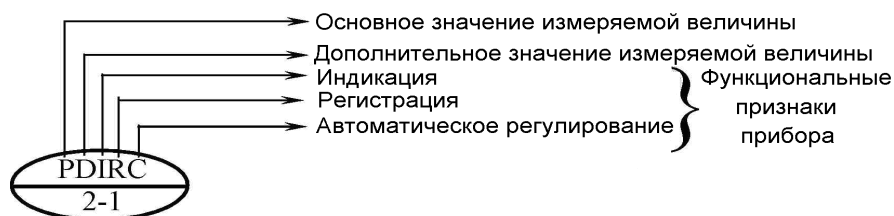


Рисунок 78 - Пример построения условного обозначения прибора

Буквы **D, F, Q** на втором месте (при уточнении измеряемой величины) можно записывать как строчные: **d, f, q**.

2) Для обозначения приняты буквы латинского алфавита, расшифровка содержания которых приведена в таблице 7. Позиции отмеченные \* могут быть использованы в качестве резервных; при этом на ФСА должна быть приведена расшифровка содержания принятого обозначения.

При использовании условных обозначений по ГОСТ 21.404-85 следует соблюдать правила снесенные в таблицу 8. Дополнительные обозначения для преобразователей и вычислительных устройств снесены в таблицу 9.

Таблица 7 - Основные и дополнительные буквенные обозначения по ГОСТ 21.404-85

Об.	Значение измеряемой величины		Функциональный признак прибора		
	Основное	Дополнительное	Отражение информации	Формирование выхода	Дополнительно
A	*	*	Сигнализация		
B	*	*	*	*	*
C	*	*		Автоматическое регулирование	
D	Плотность	Разность, перепад	*	*	*
E	Электрическая величина				Первичное преобразование
F	Расход	Соотношение, дробь, доля	*	*	*
G	Размер, положение, перемещение		*	*	*
H	Ручное воздействие		Верхний предел измеряемой величины		
I	*	*	Показания		
Y	*	*			Преобразование, вычислительные функции
K	Время				Станция управления
L	Уровень		Нижний предел измеряемой величины		
M	<i>Влажность</i>		*	*	*
N	*	*	*	*	*
P	Давление, вакуум		*	*	*
O	*	*	*	*	*
Q	Состав, концентрация	Интегрирование, суммирование	*	*	*
R	Радиоактивность		Регистрация		
S	Скорость, частота			Включение, отключение, переключение	
T	<i>Температура</i>				Дистанционная передача сигнала (промежуточное преобразование)
V	Вязкость		*	*	*
W	Масса		*	*	*
U	Несколько разнородных величин		*	*	*

Таблица 8 - Некоторые правила использования условных обозначений

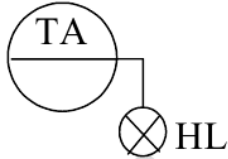
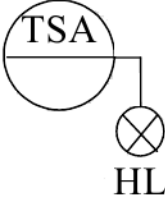
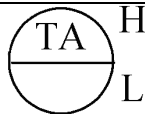
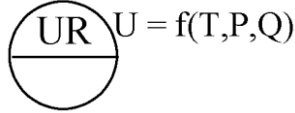
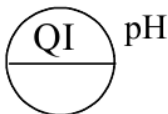
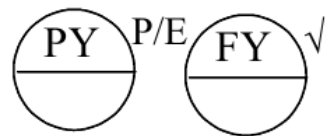
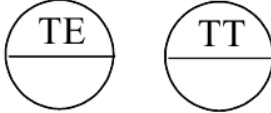

Назначение условных обозначений	Пример обозначения
Букву <b>A</b> используют для обозначения функции «сигнализация» независимо от того, вынесена ли сигнальная аппаратура на какой-либо щит или для сигнализации используются лампы, встроенные в сам прибор.	
Букву <b>S</b> используют для обозначения контактного устройства прибора, предназначенного только для включения, отключения, переключения, блокировки. При использовании контактного устройства прибора для включения, отключения и одновременно для сигнализации в обозначении прибора применяются обе буквы <b>S</b> и <b>A</b> .	
Сигнализируемые предельные значения измеряемых величин конкретизируются добавлением букв <b>H</b> и <b>L</b> , которые; наносятся вне графического обозначения, справа от него	
Буква <b>U</b> используется для обозначения приборов, измеряющих несколько разнородных величин, поэтому справа от изображения прибора должна быть приведена расшифровка этих величин.	
Для конкретизации измеряемой величины справа от изображения средства измерения, можно указать наименование или символ этой величины (ток, рН, А, НО <sub>2</sub> ).	
При построении условных обозначений преобразователей и вычислительных устройств дополнительные обозначения, расшифровывающие вид преобразования или вычислительной операции, наносятся справа от условного изображения. Список используемых дополнительных обозначений приведен в табл. 6.	
Буква <b>E</b> используется только в том случае, если это единственная функция прибора. Если прибор кроме первичного преобразования дополнительно выполняется функции, например <b>T</b> , то буква <b>E</b> опускается.	
Если вторичный измерительный прибор выполняет функции и показания ( <b>I</b> ), и регистрации ( <b>R</b> ) параметра, то букву <b>I</b> указывать не рекомендуется.	
Все устройства, выполненные в виде отдельных блоков и предназначенные для ручных операций, имеют на первом месте буквенного обозначения букву <b>H</b> .	Ручной задатчик - <b>H</b> Панель дистанционное управления - <b>HC</b> Переключатель цепей - <b>HS</b>

Таблица 9 - Дополнительные обозначения для преобразователей и вычислительных устройств

Наименование		Обозначени
Род энергии сигнала	Электрический (независимо от вида)	<b>E</b>
	Пневматический	<b>P</b>
	Гидравлический	<b>G</b>
Виды формы	Аналоговый	<b>A</b>
	Дискретный	<b>D</b>
Алгебраические	Суммирование	$\Sigma$
	Интегрирование	$\int$
	Умножение на постоянный коэффициент	$\times K$
	Перемножение сигналов	$\times$
	Извлечение корня	<b>V</b>
	Дифференцирование	$dt$
	Логарифм	$lg$

> Принципы построения позиционного обозначения средств автоматизации

1) Позиционное обозначение размещается в нижней половине окружности или овала.

2) Позиционное обозначение состоит из двух частей: номер контура управления или

контроля и через тире - номер позиции средства автоматизации в данном контуре. Причем позиционное обозначение приборов сохраняются в заказной спецификации и во всех схемах, разрабатываемых в процессе проектирования.

3) Системы управления нумеруются в следующей последовательности: сложные контура

(многоконтурные системы); одноконтурные системы регулирования и системы контроля температуры, давления, расхода, уровня, состава и качества и т.п.

4) Номера присваиваются всем элементам контура управления исходя из последовательности прохождения сигнала: от устройства получения измерительной информации к устройствам регистрации, регулирования и устройствам, осуществляющим непосредственное воздействие на объект управления.

5) Позиционные обозначения не присваиваются: отборным устройствам; приборам и средствам автоматизации, поставляемым комплектно с технологическим оборудованием.

6) Электроаппаратуре, изображенной на ФСА, присваивается буквенно-цифровое обозначение, принятое в электрических схемах. Список

некоторых элементов электрических принципиальных схем, которые также показываються на ФСА приведен в таблице 10.

Таблица 10 - Условное обозначение электрических элементов

Наименование	Обозначение	
	Буквенное	Позиционно
Кнопка	Н	SB{1,2...}
Переключатель	НС	SA{1,2...}
Магнитный	NS	KM{1,2...}
Лампа	-	HL{1,2...}

### 9.2.3. Методика оформления и графического выполнения ФСА

Чертеж ФСА должен быть выполнен на формате А1 или А2, иметь основную надпись, расположенную в правом нижнем углу формата и рамку к ней. Формы, размеры и содержание основных надписей определены ГОСТ 2.104-68.

В верхнем поле чертежа (вблизи или непосредственно в месте подсоединения к объекту) располагаются графические изображения средств автоматизации, механически связанных с технологическим оборудованием и коммуникациями, а именно датчиков или первичных преобразователей, вторичных преобразователей механических величин (перемещения, силы), регулирующих органов и исполнительных механизмов (рис. 79).

Список неуказанных в ГОСТе веществ оформляется в виде таблицы.

> Остальные приборы и средства автоматизации располагаются в нижней части чертежа и распределяются между прямоугольниками, каждый из которых отображает определенное место расположения, см. рис. IX.6. В зависимости от возможного места расположения приборы располагаются в следующей последовательности:

а) *приборы местные* (приборы, располагаемые на некотором отдалении от технологического объекта и непосредственно с ним не связанные - промежуточные преобразователи, магнитные пускатели, переключатели и т. д.);

б) *щиты управления* (приборы, располагаемые в специальных операторских щитовых помещениях, откуда ведется контроль и управление технологическим процессом - приборы визуализации, регуляторы, задатчики, панели ручного управления, средства сигнализации и т.д.);

в) *выносные модули преобразования информации в цифровой код и обратно* (аналого-цифровой преобразователь - ЦАП, цифро-импульсный

преобразователь - ЦИП и т.д.);

г) промышленные микропроцессорные контроллеры;

д) рабочие станции.

На рисунке 79 приведен пример размещения регуляторов на щите управления.

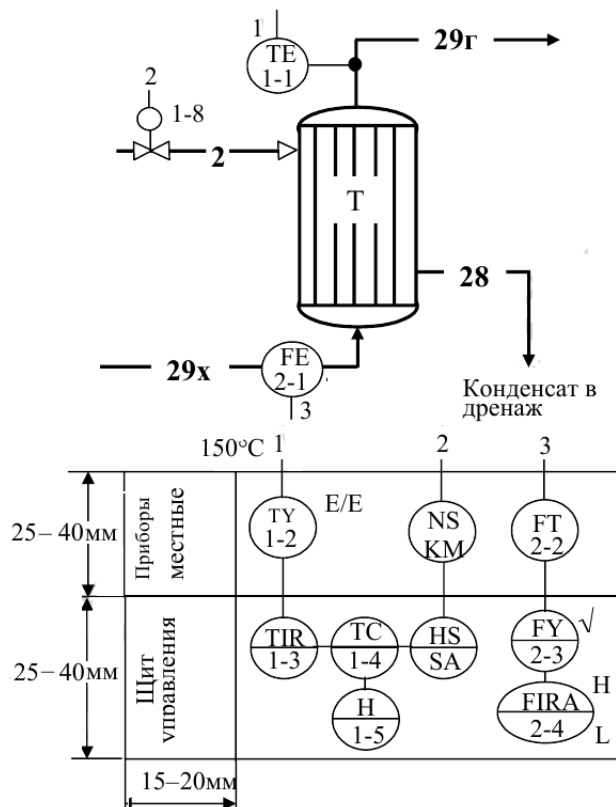


Рисунок 79 - ФСА трубчатого теплообменника с размещением регуляторов на щите управления

#### 9.2.4. Методика заполнения заказной спецификации на приборы и средства автоматизации

Спецификация предназначена для: составления сводных заказных ведомостей, чтения проектной документации, подготовки и организации монтажных работ и т.д. По ней производится закупка приборов и средств автоматизации, необходимых для реализации решений, принятых при разработке технического проекта.

В проектах систем автоматизации выполняются следующие заказные спецификации: оборудования и материалов, щитов и пультов, основных монтажных материалов и изделий и т.д.

Заказная спецификация на оборудование выполняется в сокращенном виде на формате А4 (согласно ГОСТ 21.110-82 спецификация должна

выполняться на формате А3). Форма текста, разбитого на графы заказной спецификации оборудования приведена на рисунке 80.

	15	105	25	10	15	14
Поз.	Наименование и техническая характеристика оборудования и материалов, завод-изготовитель		Тип, марка оборудования	Ед. изм.	Цена, руб.	Кол, шт.

Dimensions: 15, 105, 25, 10, 15, 14 (widths); 115, 8 (heights).

Рисунок 80 - Графы заказной спецификации

Спецификация заполняется по разделам.

> *Приборы и средства автоматизации.*

Приборы и средства автоматизации записываются в подразделе группами: сначала описываются все сложные контура контроля и регулирования, затем для измерения и регулирования температуры, давления и разряжения, расхода, количества, уровня, состава и качества веществ, прочие приборы; регуляторы и комплектные устройства.

Приборы в каждой, группе записывают комплектами по каналам контроля и регулирования в следующем порядке: местные приборы (сначала показывающие, затем - регистрирующие, далее - сигнализирующие); дистанционные измерительные комплекты в той же последовательности; комплекты систем автоматического регулирования. В пределах контура запись приборов производят сначала с первичных приборов, затем идут промежуточные преобразователи, вторичные приборы, функциональные блоки, регуляторы, исполнительные механизмы.

Аппараты и устройства, поставляемые комплектно с приборами и регуляторами, состав которых определяется конкретными условиями технологических процессов и установок, включаются в спецификацию за соответствующими позициями оборудования после слов «Комплектно поставляются».

> *Агрегатные комплексы и средства вычислительной техники.*

Оборудование подраздела «Агрегатные комплексы и средства вычислительной техники» записываются следующими группами: *машины централизованного контроля, регулирования и управления* (установки контроля, регулирования и управления; машины централизованного контроля; агрегатные комплексы пневмоавтоматики; комплексы электрических и электронных технических средств); *вычислительные комплексы* (вычислительные комплексы системы малых ЭВМ, микро Э.ВМ,



волоконно-оптические системы передачи информации).

Графы заполняются в порядке приведенном ниже.

В графе «*Позиция*» указываются позиции приборов и средств автоматизации согласно ФСА. В случае, если несколько разных контуров (регулирования или контроля) содержат один и тот же прибор, то прибор этой марки заносится в спецификацию один раз, а в графе «*Позиция*» при этом перечисляются все позиционные обозначения этого прибора согласно ФСА.

> В графе «*Наименование и техническая характеристика оборудования и материалов, завод-изготовитель*» приводят наименование приборов и средств автоматизации, их технические характеристики в соответствии с требованиями стандартов, технических условий и другой технической документации.

Для оборудования указывают характеристики и параметры, однозначно определяющие выбранное оборудование (не обозначенные в типе, марке, модификации), а также комплектность в объеме, установленном ТУ. Например, оговаривают поставку комплектно с преобразователями давления соединений для подключения внешних трубных проводок; для первичных приборов и преобразователей, которые соприкасаются с измеряемой средой, указывают наименования и предельные значения параметров этой среды. Для импортных приборов указывается страна и фирма.

В графе «*Тип, марка оборудования*» записывается тип, марка оборудования, обозначение стандарта или технических условий (ТУ) на оборудование.

Если обозначение ТУ на оборудование и изделия превышает десять знаков, то это обозначение допускается приводить в графе «*Наименование и техническая характеристика оборудования и материалов, завод-изготовитель*».

> В графе «*Единицы измерения*» указывается наименование единицы измерения. При записи оборудования в этой графе указываются штуки, при записи материалов соответственно метры, килограммы и т.д.

> В графе «*Цена*» записывается цена оборудования.

> В графе «*Количество*» проставляется количество оборудования, предусмотренного рабочей документацией.

Спецификация обычно состоит из нескольких листов. При переходе на следующий лист первая графа с наименованием граф повторяется.

## **10 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

Контрольные работы студенты должны выполнять согласно учебного графика.

Выполнение контрольных работ является итогом самостоятельной работы студентов заочной формы обучения над соответствующими разделами учебной дисциплины «Системы управления химико-технологическими процессами».

При выполнении контрольных работ студент должен руководствоваться следующими требованиями:

1. Студент самостоятельно выбирает задания контрольных работ согласно первой буквы фамилии студента.
2. Студент должен подготовить и заблаговременно сдать на проверку контрольные работы.
3. Контрольные работы могут быть написаны от руки на листах формата А 4 или представлены в распечатанном виде. Листы должны быть скреплены. На титульном листе указывается фамилия, имя, отчество студента, номер учебной группы, название учебной дисциплины, номер контрольной работы, номер варианта и ставится дата сдачи и личная подпись студента.
4. Вариант контрольных работ может быть изменен по согласованию с преподавателем. Могут быть предложены новые варианты, но только в рамках дисциплины «Системы управления химико-технологическими процессами».

## 11 КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### 11.1 Контрольная работа № 1

Дана одноконтурная АСР (рис. 81), для которой заданы дифференциальные уравнения:

а) объекта управления

$$a_1 \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_2 \cdot \frac{dx(t)}{dt} + a_3 \cdot x(t) = b \cdot u(t) + c \cdot f(t)$$

в) регулятора

$$\frac{du(t)}{dt} = c_1 \cdot \frac{de(t)}{dt} + c_2 \cdot e(t)$$

Требуется определить:

- передаточную функцию разомкнутой системы;
- передаточные функции замкнутой системы  $W_y(s)$  - по заданию,  $W_f(s)$  – по возмущению

Полученные передаточные функции записываются с рассчитанными численными значениями коэффициентов.

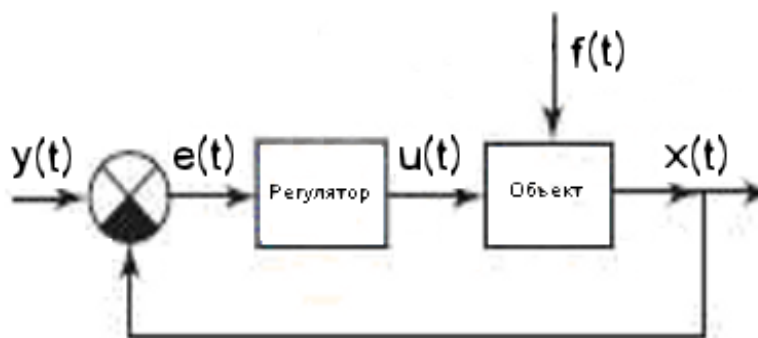


Рисунок 81 - Одноконтурная АСР

Таблица 12 – Исходные данные для контрольной работы 1

№ задания	Буква	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$c$	$b$	$c_1$	$c_2$
1	А, П	2	3.6	5.7	6.4	1	7.3	4.25
2	Б, Р	2.5	8.2	3.8	3.3	2	12	1.75
3	В, С	7	9.1	6.4	8	3	6.4	5
4	Г, Т	6.5	10.5	5.9	12	4	3.3	6.4
5	Д, У	4	7.5	3.3	6.5	5	8	2.5
6	Е, Ф	4.25	7.3	9.4	3.6	6	5.9	7
7	Ж, Х	1.75	12	3.6	8.2	7	3.3	7.3
8	З, Ц	5	8	8.2	9.1	8	9.4	12
9	И, Ч	6.4	12	9.1	10.5	9	6.4	6.4
10	К, Ш	3.3	6.5	10.5	7.5	10	5.9	3.3
11	Л, Щ	8	8	7.5	5.7	11	3.3	8
12	М, Э	12	12	7.3	3.8	12	4.25	5.9
13	Н, Ю	6.5	6.5	12	6.4	13	1.75	3.3
14	О, Я	11	8	5.5	5.9	14	5	9.4

**Пример решения контрольной работы № 1**

Даны следующие значения:

$$a_1 = 11,$$

$$a_2 = 8,$$

$$a_3 = 5.5,$$

$$c = 5.9,$$

$$b = 14,$$

$$c_1 = 5,$$

$$c_2 = 9.4.$$

Передаточная функция объекта регулирования по каналу управляющего воздействия:

$$W_{об,u}(s) = \frac{b}{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}$$

Передаточная функция объекта регулирования по каналу возмущающего воздействия:

$$W_{об,r}(s) = \frac{c}{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}$$

Передаточная функция регулятора:

$$W_p(s) = \frac{C_1 s + C_2}{s}$$

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{раз}(s) = W_{об,у}(s) \cdot W_p(s)$$

Передаточная функция замкнутой системы по заданию:

$$W_y(s) = \frac{W_{раз}(s)}{1 + W_{раз}(s)}$$

Передаточная функция замкнутой системы по возмущению:

$$W_f(s) = \frac{W_{об,ф}(s)}{1 + W_{раз}(s)}$$

После подстановки имеющихся в задании на контрольную работу численных значений всех коэффициентов получим:

$$W_y(s) = \frac{70s + 131,6}{11s^3 + 8s^2 + 75,5s + 131,6} \quad W_f(s) = \frac{12s}{11s^3 + 8s^2 + 75,5s + 131,6}$$

## 11.2 Контрольная работа № 2

Исходя из результатов первой контрольной работы определить методом Гурвица устойчива ли данная АСР.

### *Примеры решения контрольной работы № 2*

После решения первой контрольной работы были получены передаточные функции по заданию и по возмущению:

$$W_y(s) = \frac{70s + 131,6}{11s^3 + 8s^2 + 75,5s + 131,6} \quad W_f(s) = \frac{12s}{11s^3 + 8s^2 + 75,5s + 131,6}$$

Возьмем из знаменателя функций коэффициенты и для расчета по Гурвицу получим  $C_0=11$ ,  $C_1=8$ ,  $C_2=75.5$   $C_3=131.6$ .

Далее строим главный определитель Гурвица по следующему правилу: по главной диагонали выписываются все коэффициенты от  $C_1$  до  $C_3$  в порядке возрастания:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} C_1 & C_3 & C_5 \\ C_0 & C_2 & C_4 \\ 0 & C_1 & C_3 \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 8 & 134.6 & 0 \\ 11 & 75.5 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} C_1 & C_3 \\ C_0 & C_2 \end{vmatrix} \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 8 & 134.6 \\ 11 & 75.5 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = |C_1|$$

$$\Delta_0 = C_0$$

Исходя из этого  $\Delta_0=11$ ,  $\Delta_1=8$ ,  $\Delta_2=-843,6$ ,  $\Delta_3=-111017,76$

При  $C_0 > 0$  для устойчивости АСР необходимо и достаточно выполнение условий:  $\Delta_0 > 0$ ,  $\Delta_1 > 0$ ,  $\Delta_2 > 0$ , .....  $\Delta_N > 0$ ,

**Вывод:** так как  $\Delta_2 < 0$  и  $\Delta_3 < 0$ , система неустойчива.

### 11.3 Контрольная работа № 3

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта.

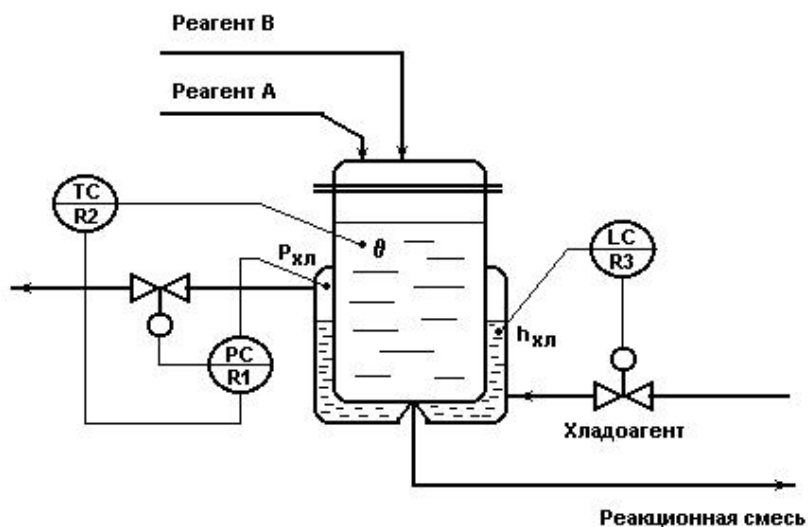
Требуется перечислить все задачи автоматизации, которые решены на этой схеме. Дать подробное письменное описание схемы автоматизации, указав все показывающие, регулирующие, сигнализирующие и аварийные средства.

Таблица 13 – Номер варианта для контрольной работы 2

Буква	А,П	Б,Р	В,С	Г,Т	Д,У	Е,Ф	Ж,Х	З,Ц	И,Ч	К,Ш	Л,Щ	М,Э	Н,Э	О,Я
Номер варианта	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14

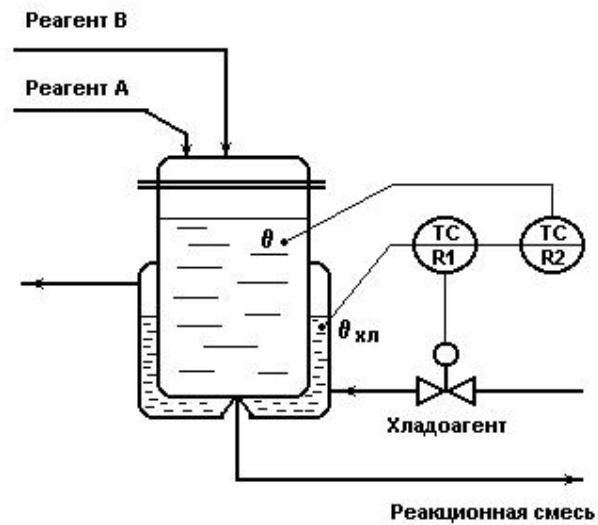
#### Вариант 1

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта.



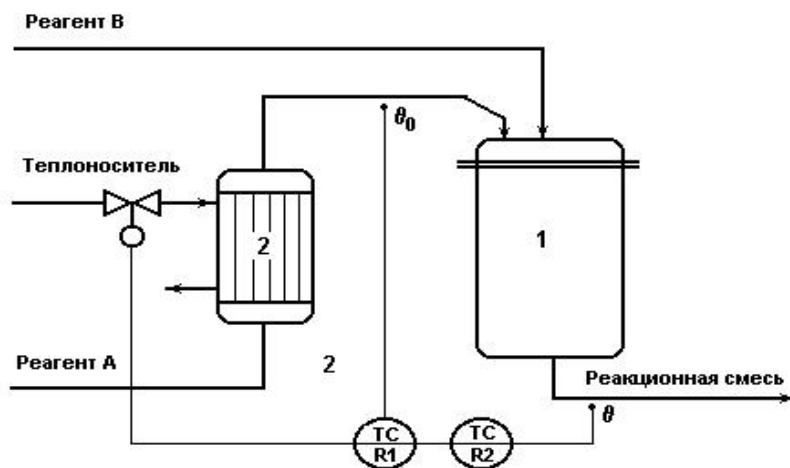
### Вариант 2

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



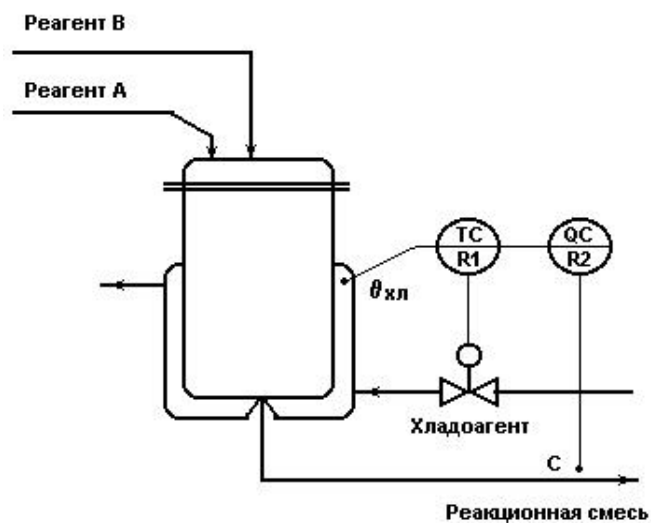
### Вариант 3

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



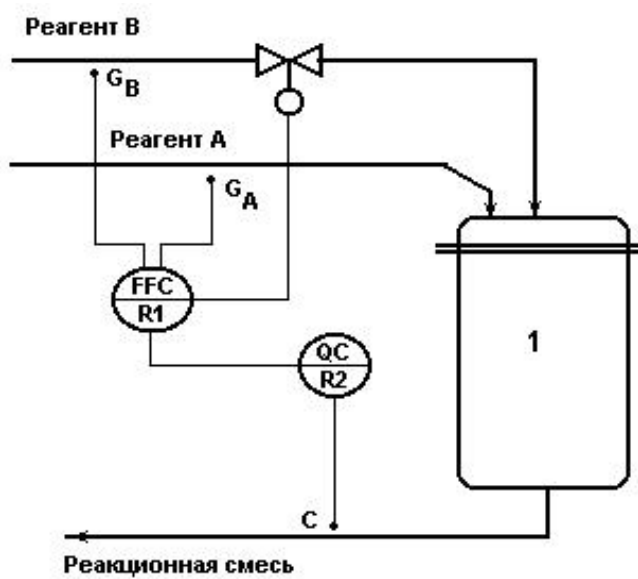
### Вариант 4

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



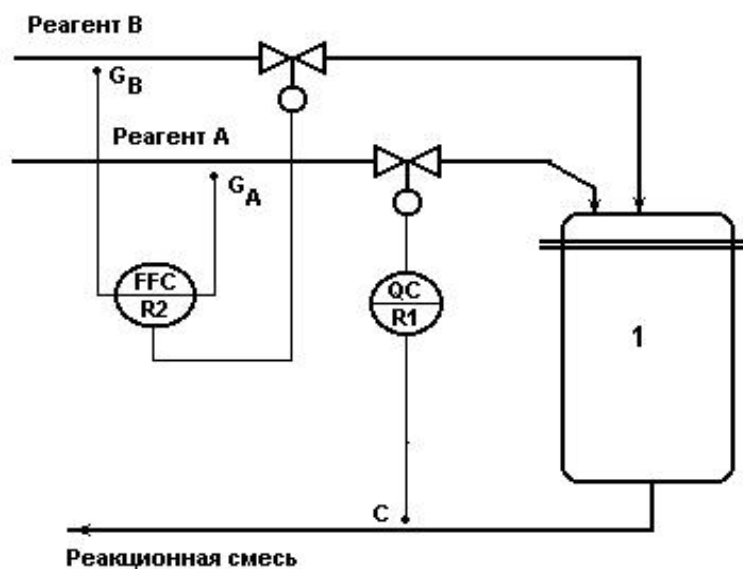
### Вариант 5

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



### Вариант 6

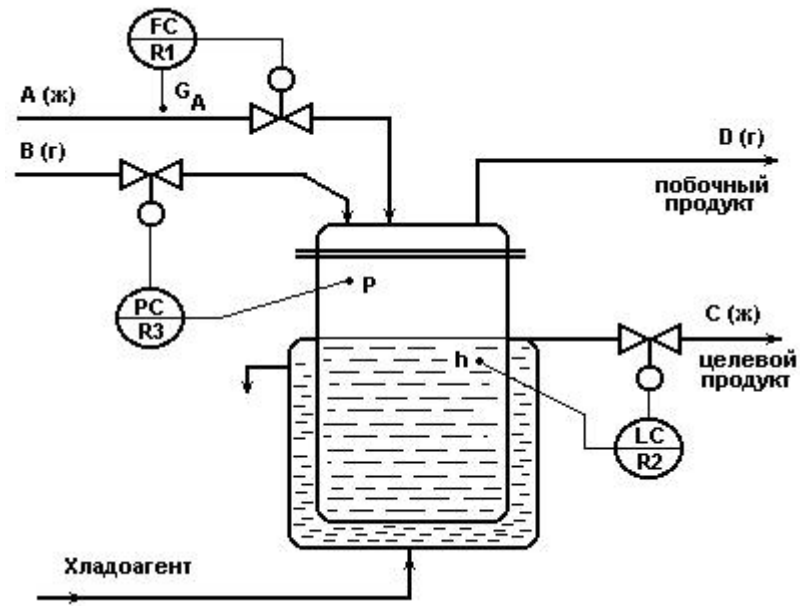
Дана схема автоматизации химико-технологического объекта





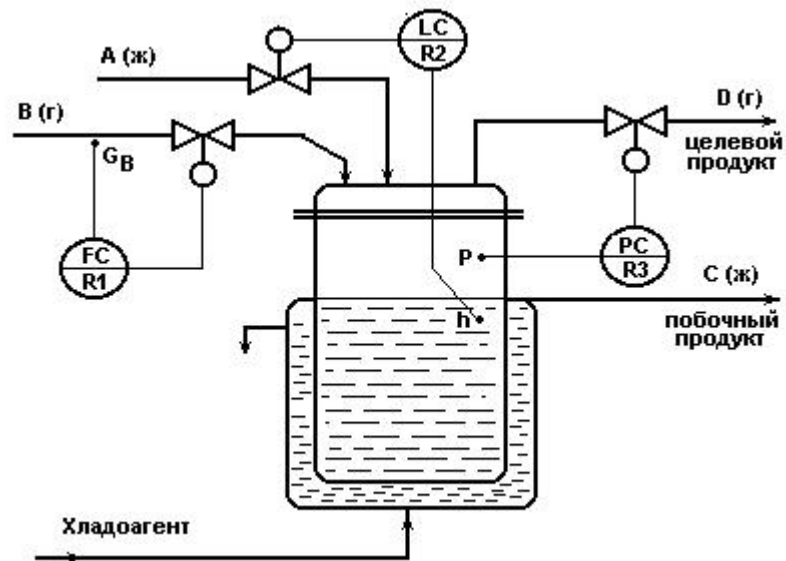
### Вариант 7

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



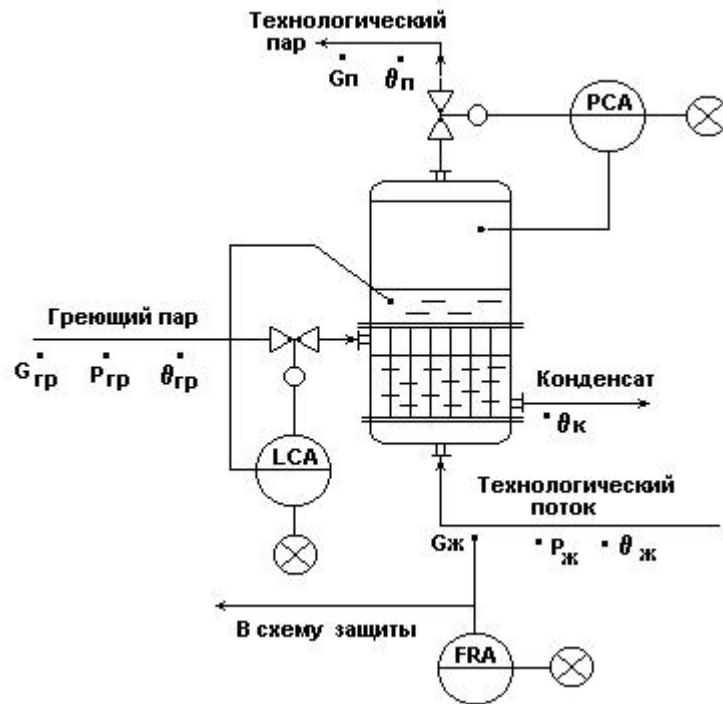
### Вариант 8

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



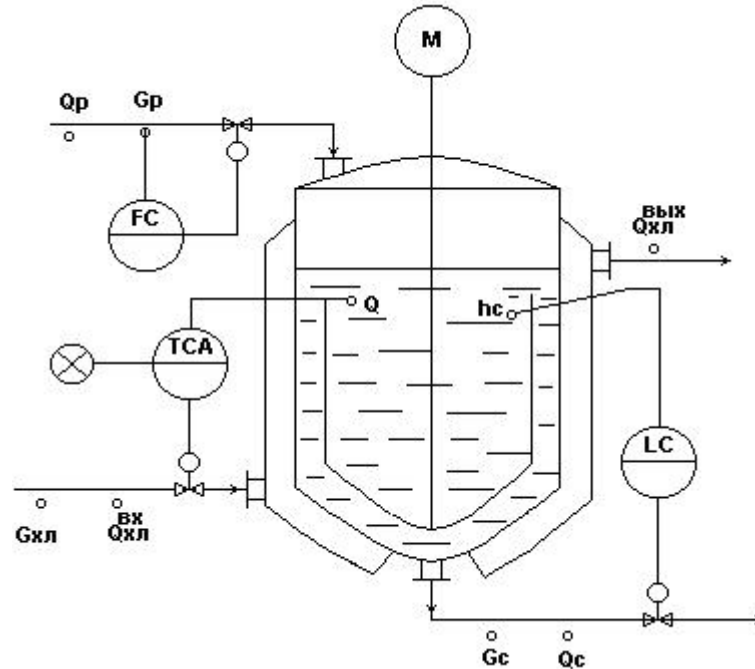
### Вариант 9

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



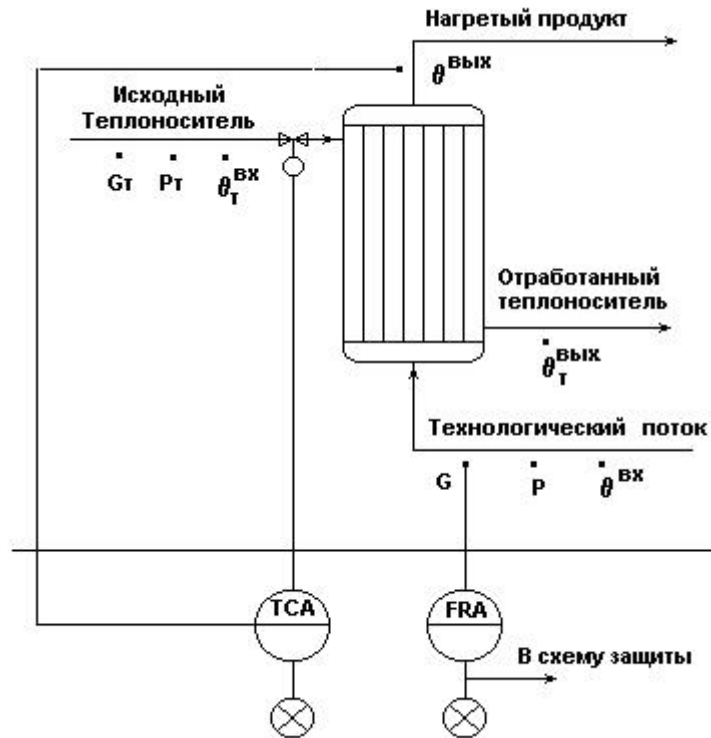
### Вариант 10

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



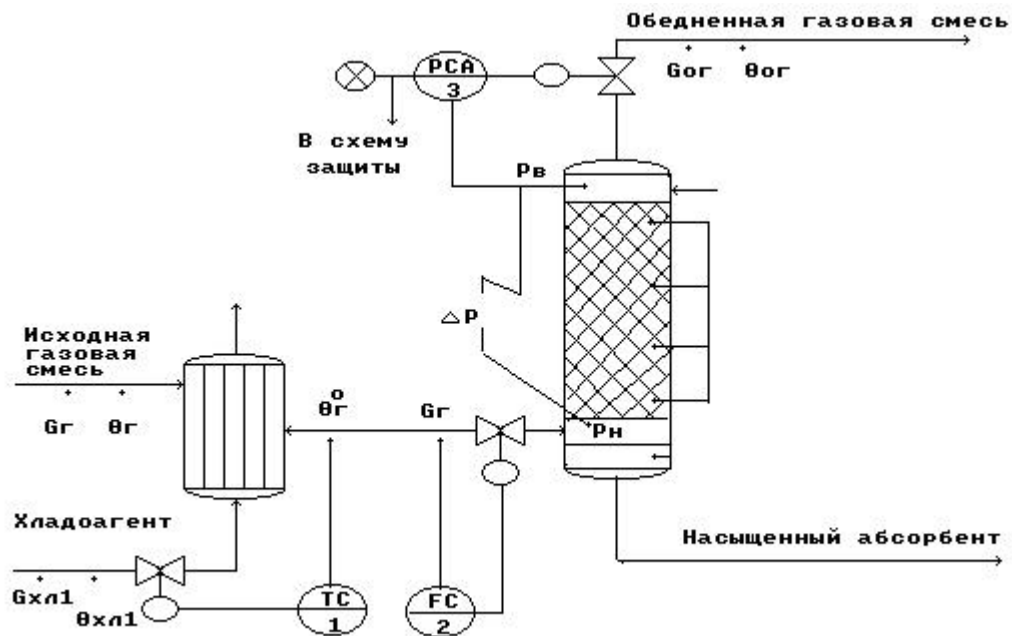
## Вариант 11

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



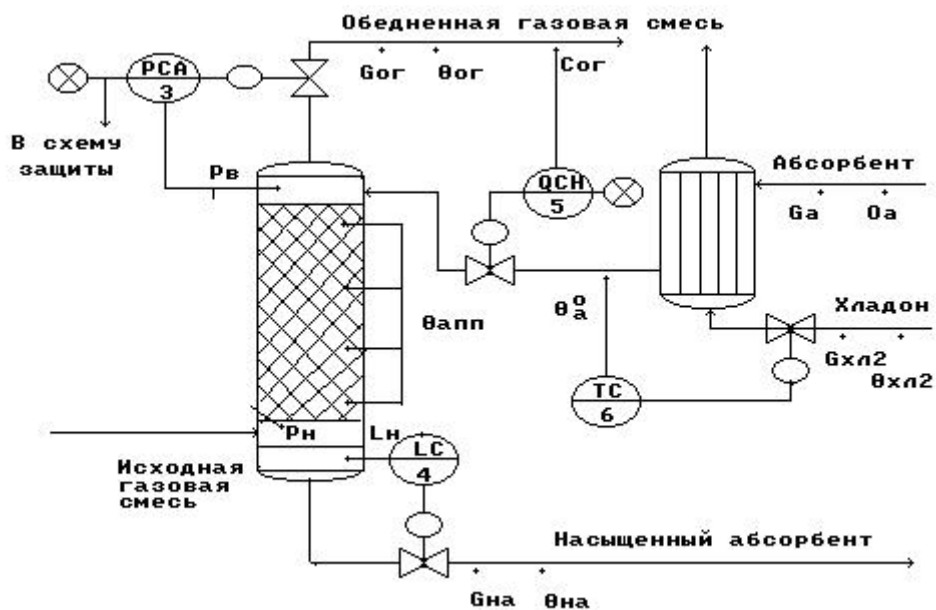
## Вариант 12

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



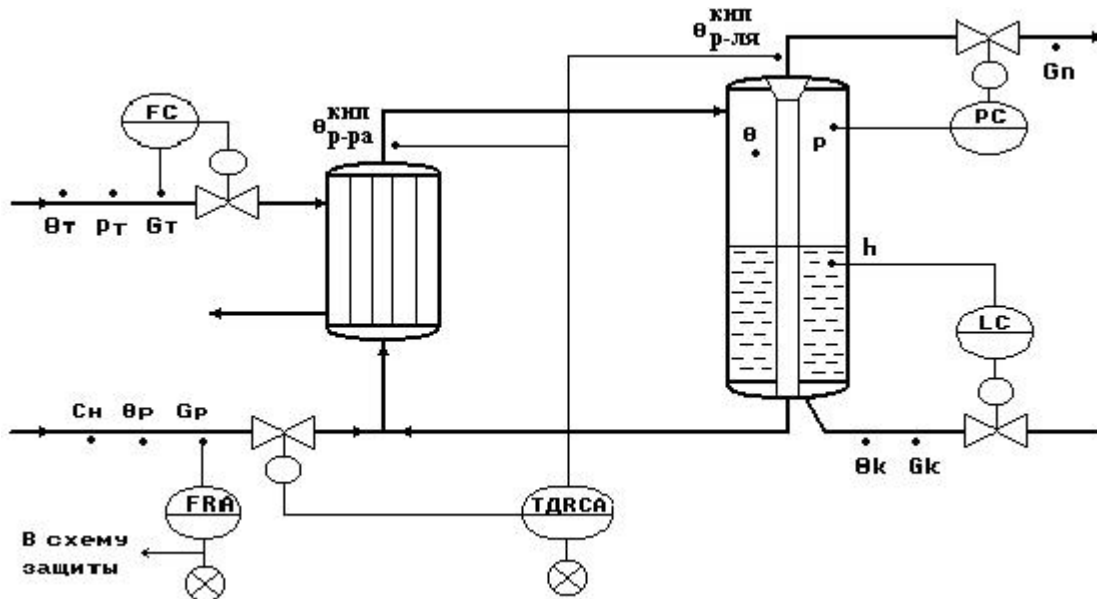
### Вариант 13

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



### Вариант 14

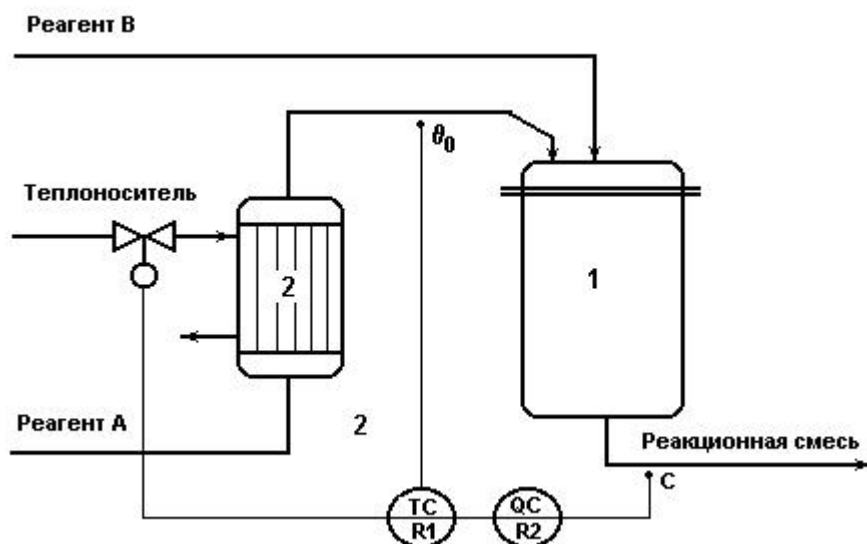
Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



### Примеры решения контрольной работы № 3

#### Пример 1

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



Система автоматического регулирования, представленная на рисунке, является каскадной.

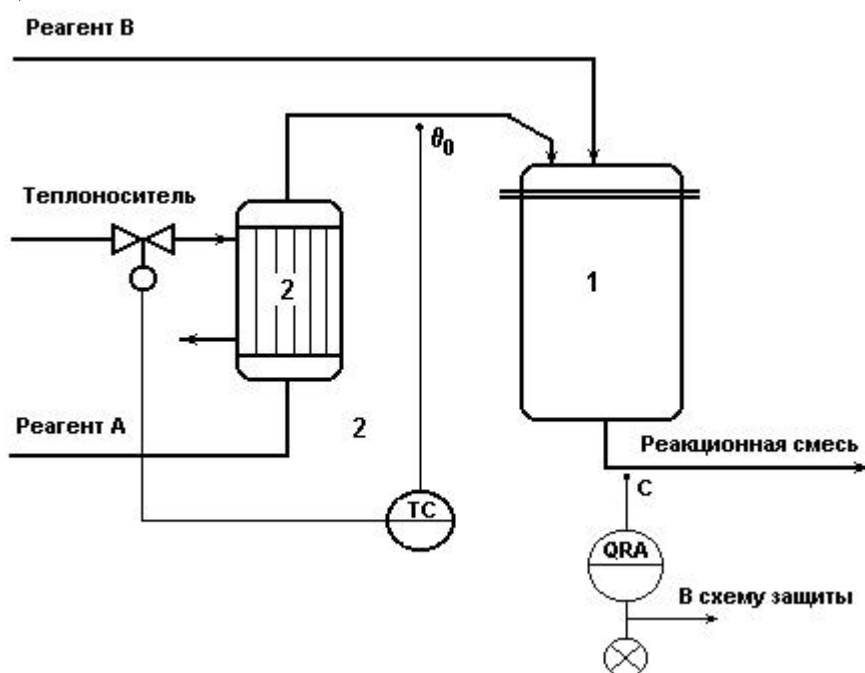
На схеме осуществляется регулирование концентрации реакционной смеси по двум контурам:

1-й контур (основной) – R2 – регулятор корректирующий концентрацию реакционной смеси путем изменения расхода теплоносителя в теплообменный аппарат 2.

2-й контур (вспомогательный) – R1 – стабилизирующий температуру реагента А после теплообменного аппарата 2 за счет изменения расхода теплоносителя в теплообменный аппарат.

## Пример 2

Дана схема автоматизации химико-технологического объекта



На схеме осуществляется регулирование температуры реагента А после теплообменного аппарата 2 (регулятор ТС) за счет изменения расхода теплоносителя в теплообменный аппарат.

QRA - регулятор с сигнализацией, регистрирующий концентрацию реакционной смеси и отправляющий данные в схему защиты.

## Литература

1. Кулаков М.В. Технические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. - 424 с.
2. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Учеб. пособ. -М.: Химия, 1982. - 296 с.
3. Теория автоматического управления: Нелинейные системы, управление при случайных воздействиях: Учебник для вузов/Под редакцией. Нетушила А.В., Палтушевич В.В. и др. -М.: Высш. шк., 1983.- 432с.
4. Камразе А.Н., Фитерман М.Я. Контрольно-измерительные приборы и автоматика. Л.: Химия, 1988. - 225 с.
5. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины: Справочник /Под ред. Кошарского Б.Д. -Изд. 3-е. -Л.: Машиностроение, 1976. -486с.
6. ГОСТ 21.404-85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации.

**Кафедра ресурсосберегающих технологий**

Учебное пособие

для студентов заочной формы обучения  
специальности «Рациональное использование материальных и  
энергетических ресурсов»

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ**

Владимир Львович Рукин  
Ульяна Юрьевна Коробейникова

---

Отпечатано с оригинал-макета. Формат 60x90. <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Печ.л. 7.688. Тираж 50 экз.

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26