



С. В. Чумаченко

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Костанай, 2021

Министерство образования и науки Республики Казахстан Костанайский  
региональный университет им. А. Байтурсынова  
Кафедра электроэнергетики

Чумаченко Светлана Владимировна

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

Костанай, 2021

УДК 681.5(075.8)

ББК 32.965я 73

Ч 90

**Автор:**

Чумаченко Светлана Владимировна

**Рецензенты:**

Иванченко Павел Григорьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией использования машинно-тракторного парка КФ ТОО «НПЦ агроинженерии»

Кошкин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Костанайского регионального университета им. А. Байтурсынова

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук, профессор Костанайского регионального университета им. А. Байтурсынова

Чумаченко С.В.

Ч 90 Автоматизация технологических процессов. - Костанай: КГУ имени А. Байтурсынова, 2021. – 135 с.

ISBN 978-601-356-095-3

В пособие включены основные темы, которые необходимо рассмотреть в процессе изучения дисциплины «Автоматизация технологических процессов», вопросы для самопроверки по каждой теме.

Предназначено для студентов очной и дистанционной форм обучения образовательных программ: 5B071800/6B07102 – Электроэнергетика. Данное учебное пособие может быть использовано студентами других образовательных программ.

УДК 681.5(075.8)

ББК 32.965я 73

Утверждено Методическим советом Костанайского регионального университета им. А. Байтурсынова, протокол от 30.11. 2021 г. № 7.

ISBN 978-601-356-095-3

© Чумаченко С.В., 2021

## Содержание

Введение .....	4
1 Основные понятия и принципы построения систем автоматического управления (САУ) .....	6
2 Математическое описание линейных непрерывных систем управления .....	12
3 Устойчивость систем автоматического управления .....	37
4 Виды и типы схем автоматизации .....	64
5 Технические средства автоматизации. Общие сведения .....	73
6 Воспринимающие элементы и датчики .....	74
7 Сравнивающие устройства .....	90
8 Задающие устройства .....	92
9 Усилители .....	94
10 Исполнительные устройства .....	106
11 Реле автоматики .....	111
12 Логические элементы .....	115
13 Регуляторы .....	119
14 Техничко-экономическая эффективность .....	128
Заключение .....	134
Список использованных источников .....	135

## Введение

Автоматизация - высший этап развития машинной техники, на котором работники сельского хозяйства высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными процессами и операциями управления ими. Автоматизация способствует повышению производительности труда, улучшению условий труда, сближению физического и умственного труда. Технические средства автоматизации обеспечивают получение информации о состоянии управляемого объекта, формирование управляющих воздействий на управляемый объект, передачу информации оперативному персоналу и в смежные или вышестоящие системы управления. Целесообразность применения автоматизации обуславливается высоким экономическим эффектом.

Автоматизация технологических объектов осуществляется путём внедрения систем контроля, управления и регулирования на базе технических средств автоматизации общепромышленного и отраслевого назначения.

В автоматических системах применяются автоматические регуляторы и устройства логического управления, выполняющие функции контроля и управления объектом без участия оперативного персонала. Человек лишь включает автоматическую систему в работу и контролирует её исправность.

Сельское хозяйство предъявляет ряд специфических требований к методам и средствам автоматизации. Большинство технологических процессов в сельском хозяйстве связано с живыми организмами, которые весьма восприимчивы к нарушению технологии, поэтому неправильная работа, перебой в действии машин и оборудования, искажение режимов технологических процессов ведут к ухудшению продуктивности животных и птицы, снижению качества сельскохозяйственной продукции.

Автоматизация производства – отрасль науки и техники, которая исследует и применяет теорию автоматического управления, принципы построения автоматических систем и технические средства для реализации этих схем. Как наука она возникла во второй половине XVIII века, когда появились первые сложные машины – орудия, которые заменили тяжелый ручной труд и дали возможность поднять его производительность. В это время на смену простейшим двигателям пришли на смену паровые машины.

Впервые с необходимостью построения регуляторов столкнулись создатели сложных механизмов и высокоточных устройств – дозаторов, часов и т.п.

Во втором веке до нашей эры арабы снабдили поплавковым регулятором уровня водяные часы. В 1657 году для похожих целей Гюйгенс встроил в механические часы маятниковый регулятор хода. Герон Александрийский, живший в первом столетии нашей эры, написал книгу под названием «Пневматика», в которой он привёл несколько чертежей поплавковых регуляторов уровня воды. Голландский механик и химик К. Дреббель (1572...1633 г.) изобрёл регулятор температуры. Этот регулятор содержал

устройство, позволяющее выпускать нагретый воздух из камеры, когда температура в ней достигала желаемого результата. Система управления, собранная на основе этого регулятора, считается первой системой с обратной связью, изобретённой в Европе.

Развитие промышленных регуляторов началось на рубеже XVIII и XIX столетий, в эпоху промышленного переворота в Европе. Первыми промышленными регуляторами этого периода являются автоматический поплавковый регулятор питания котла паровой машины, использованный в 1765 году И.И. Ползуновым, и центробежный регулятор скорости паровой машины, на который в 1784 году получил патент Дж. Уатт. В 1830 г. Понселе предложил построить регулятор, действие которого было направлено на компенсацию изменения нормального функционирования системы от возмущения. Принцип Понселе (принцип компенсации возмущающего воздействия) – второй фундаментальный принцип управления. В 1868 г. английский физик Д. Максвелл в работе “О регуляторах” поставил и рассмотрел математическую задачу об устойчивости систем регулирования

Переход от регуляторов прямого действия к регуляторам непрямого действия, с одной стороны, осложнил проблему устойчивости, введя в контур дополнительные инерционные звенья, с другой стороны, сделало схемы регуляторов более гибкими, дав возможность введения в различные точки схемы дополнительных связей и корректирующих звеньев.

Быстрое развитие систем автоматического управления вело к необходимости создания более эффективных методов исследования. В 1932 г. американский учёный Х. Найквист предложил критерий устойчивости по частотным характеристикам системы в разомкнутом состоянии, а в 1936 г. А.В. Михайлов показывает преимущества применения частотных методов, предложив свой критерий устойчивости, не требующий предварительного размыкания цепи. С введением частотных методов начинается новый этап ускоренного развития теории управления. Американские учёные Г. Боде и Л. Маккол в 1946 г., русский учёный В.В. Солодовников в 1948 г. разработали метод логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ).

В 1940-1950 годы сформировалась по существу новая современная теория автоматического управления. В области устойчивости разработаны методы, существенно облегчающие применение различных критериев устойчивости, введены различные количественные оценки показателей качества процессов регулирования (время регулирования, перерегулирование, колебательность, выброс, степень устойчивости).

По мере развития техники и освобождения человека от тяжелого физического труда функции управления процессами и орудиями труда не уменьшались, а все больше расширялись и усложнялись. Во многих случаях человек утратил возможность управлять механизированным производством без специальных дополнительных устройств. Это и обусловило возникновение и развитие автоматического производства. Во второй половине XX века наряду со средствами автоматики стали использоваться средства телемеханики.

## 1 Основные понятия и принципы построения систем автоматического управления (САУ)

### План:

1. Объекты управления и их свойства.
2. Классификация систем управления.
3. Задачи автоматического управления (алгоритмы функционирования).
4. Законы управления. Принципы управления САУ. Обратная связь и ее типы.

1. Для выполнения какого-либо технологического процесса и получения готовой продукции с заданными свойствами и заданного качества необходимо выполнить два вида операций: **рабочие операции** и **операции управления**. Целью любого технологического процесса является получение готовой продукции с заданными свойствами.

**Рабочие операции** – действия, которые необходимо совершить для выполнения технологического процесса в соответствии с законами природы. Замена труда человека трудом машин и механизмов в рабочих операциях называется **механизацией**.

**Операции управления** – операции начала, окончания работы, операции переключения с режима на режим, операции выделения необходимых материальных и энергетических ресурсов и т.п. Замена труда человека трудом машин и механизмов в операциях управления называется **автоматизацией**. Машинные или механизмы (установки), выполняющие операции управления называются **автоматами**.

**Объект управления (ОУ)** – совокупность технических средств, орудий труда и т.п., с помощью которых выполняется технологический процесс. Существует ряд технологических процессов, на ход которых существенно влияет окружающая среда, в этом случае необходимо ее вводить в состав объекта управления. Во всех остальных случаях окружающая среда не входит в состав объекта управления. Все объекты управления обладают рядом свойств: нагрузка, емкость, самовыравнивание, инерционность, запаздывание, время разгона, постоянная времени.

Для возможности управления объект управления имеет один или несколько **органов управления (регулирующих органов)**, при помощи которых можно изменять поступление в объект управления энергии или вещества, изменяя его состояние в соответствии с предписанным регламентом работы. Состояние объекта управления может характеризоваться многими показателями или параметрами. Основным показателем, для которого определяют цель управления, называется **управляемой (выходной) величиной**. Независимо от физической природы она обычно обозначается  $y(t)$ . Основной задачей автоматического управления будет являться обеспечение равенства между выходной величиной и **задающим (входным) воздействием**

(*величиной*). Обычно входная величина обозначается  $x(t)$ . В процессе работы на объект управления действуют различные внешние и внутренние факторы – *возмущающие воздействия* (*возмущения*), которые обозначим  $f(t)$ . Эти возмущения приводят к изменению управляемой величины и отклонению выходной величины от заданного значения. Это отклонение обозначим следующим образом:

$$e = x_0 - y, \quad (1)$$

где  $x_0$  – заданное значение выходной величины,  $y$  – действительное значение выходной величины. Причем  $e$  может быть как больше нуля, так и меньше нуля в зависимости от величины возмущающего воздействия.

*Управляющие воздействия* (обозначим их  $u(t)$ ) стремятся вернуть выходную величину к заданному значению, их величина и знак будут зависеть от величины и знака отклонения выходной величины от заданного значения.

2. Совокупность объекта управления и автоматических устройств, выполняющих операции управления, называется *системой управления*. Для создания системы управления необходимо вначале полностью механизировать технологический процесс. Системы управления можно разделить на: *автоматизированные системы управления (АСУ)* и *системы автоматического управления (САУ)*.

*Автоматизированными системами управления* называются системы, в которых часть операций управления выполняют автоматические устройства, а часть (обычно наиболее ответственные операции управления) сохраняются за человеком.

*Системами автоматического управления* называются системы управления, в которых все операции управления выполняют автоматические устройства.

*Одномерными (системами с одним каналом управления «вход-выход»)* называют системы управления, в которых выделяют одну входную и одну выходную величину. *Многомерными* называют системы с несколькими входными и выходными величинами.

Классификация САУ может быть осуществлена также и по другим принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, вид применяемой энергии, используемые алгоритмы управления и функционирования и т.д., например:

- в зависимости от характера изменения задающего воздействия во времени: стабилизирующие, программные, следящие;
- в зависимости от конфигурации цепи воздействий: с разомкнутой цепью воздействий (разомкнутая система), с замкнутой цепью воздействий (замкнутая система), с комбинированной цепью воздействий (комбинированная система);
- в зависимости от способа выработки управляющего воздействия: беспоисковые, поисковые;
- в зависимости от вида сигналов, действующих в системах: непрерывные, дискретные;



- по степени зависимости управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия: статические, астатические;
- по виду дифференциальных уравнений, описывающих элементы САУ: линейные, нелинейные;
- в зависимости от принадлежности источника энергии, при помощи которого создается управляющее воздействие: прямого действия, непрямого действия.

3. В технологическом производстве используется множество машин, механизмов и установок, предназначенных для выполнения разнообразных функций. Управление ими направлено на достижение определенной цели, для которой эта машина создана. Совокупность правил предписаний или математических зависимостей, определяющих последовательность изменения выходной величины, соответствующее нормальному функционированию объекта, называется **алгоритмом функционирования (АФ)**. Алгоритм функционирования отражает и представляет фактическую цель управления и определяется на основе технологических, экономических и других требований изменения выходной величины объекта в процессе его функционирования.

Основными алгоритмами функционирования считаются:

1) **алгоритм стабилизации** – это алгоритм функционирования, при котором значение управляемой величины объекта поддерживается неизменным:  $y(t) \gg const$ . Знак « $\gg$ » означает, что управляемая величина поддерживается на заданном уровне с некоторой ошибкой. Стабилизирующие системы самые распространенные в промышленной автоматике. Их применяют для стабилизации различных физических величин, характеризующих состояние технологических объектов.

2) **программное управление** – алгоритм функционирования, при котором управляемая величина объекта изменяется по заранее заданной программе. Системы, реализующие данный алгоритм функционирования называют *программными*. Программа может быть задана во времени (временное программное управление) и в пространстве (пространственное программное управление). Главной задачей систем программного управления является воспроизведение программы с заданной точностью.

3) **следающие системы** – алгоритм функционирования следящей системы заключается в том, что выходная величина должна повторять изменение входной величины, причем закон изменения последней заранее неизвестен. Основной задачей следящих систем является точное воспроизведение входной величины при наличии возмущений.

4) **алгоритм поиска экстремума** – предполагает отыскание и поддержание выходной переменной объекта управления при изменении состояния объекта и возмущений.

5) **алгоритм оптимального управления** – предполагает достижение наилучших в определенном смысле условий работы объекта управления в переходном режиме при наличии ограничений на входные, выходные величины и переменные состояния объекта.

б) **алгоритм адаптации** – предполагает такое изменение выходных величин объекта управления, при которых сохраняется заданное качество работы объекта, при этом система может изменять свои параметры и структуру.

7) **алгоритм управления** – зависит как от алгоритма функционирования, так и от динамических свойств объекта управления. Эта связь может быть представлена различными математическими зависимостями. В общем случае:

$$u(t) = A[y(t), f(t)], \quad (2)$$

где  $A$  – оператор определяющий вид зависимости.

4. Математическая зависимость, устанавливающая связь между управляющим воздействием и выходной величиной объекта управления, называется **законом управления**. Законы управления делятся на: *позиционные (релейные)* и *непрерывные*.

**Позиционный (релейный)** закон – управляющее воздействие появляется только при достижении управляемой величиной заданного порогового значения. При этом управляющее воздействие принимает определенное фиксированное значение (позицию) в зависимости от того порогового значения, которого достигла выходная величина. Регулирующее воздействие в позиционных законах может принимать два или три фиксированных значения (позиции), при определённых значениях регулируемого параметра, и соответственно называются: *двухпозиционными* и *трёхпозиционными*. В *двухпозиционных законах* регулирующий орган может занимать только два положения: больше – меньше, открыто – закрыто, включен – отключен. Двухпозиционное регулирование осуществляется тем лучше, чем больше ёмкость объекта. Недостатком двухпозиционного объекта регулирования является невозможность сочетания быстрого регулирования, когда требуется большая мощность и высокая точность регулирования, когда требуется небольшая избыточная мощность. В *трёхпозиционных законах* регулирующий орган имеет ещё среднее положение, в котором обеспечивается подача энергии или вещества в объект в количествах соответствующих его потреблению при нормальной нагрузке и заданном значении регулируемой величины. Трёхпозиционный закон осуществляют более качественное регулирование, чем двухпозиционный.

В непрерывных законах управления регулирующий (управляющий) сигнал подаётся на исполнительный орган непрерывно при наличии отклонения регулируемой величины от заданного значения. В линейных регуляторах непрерывного действия управляющее воздействие линейно зависит от отклонения выходной величины от заданного воздействия, его интеграла и первой производной по времени. Различают следующие непрерывные законы управления:

1) **пропорциональный закон (П-закон)** - величина управляющего воздействия пропорциональна отклонению выходной величины от заданного

значения:

$$u = k_p e, \quad (3)$$

где:  $k_p$  – коэффициент передачи,  $\varepsilon = x_0 - y$  – отклонение выходной величины от заданного значения.

2) **интегральный закон (И-закон)** - величина управляющего воздействия пропорциональна интегралу отклонению выходной величины от заданного значения:

$$u = \frac{k_p}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt, \quad (4)$$

где  $T_u$  – имеет размерность времени и называется постоянной интегрирования.

3) **дифференциальный закон (Д-закон)** - величина управляющего воздействия пропорциональна первой производной по времени отклонения выходной величины от заданного значения:

$$u = k_p T_d \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (5)$$

Где  $T_d$  – имеет размерность времени и называется постоянной дифференцирования.

4) **пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон)** - величина управляющего воздействия пропорциональна отклонению выходной величины от заданного значения и интегралу отклонения выходной величины от заданного значения:

$$u = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt \right), \quad (6)$$

5) **пропорционально-дифференциальный закон (ПД-закон)** – величина управляющего воздействия пропорциональна отклонению выходной величины от заданного значения и первой производной по времени отклонения выходной величины от заданного значения:

$$u = k_p \left( \varepsilon + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (7)$$

б) **пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон)** - величина управляющего воздействия пропорциональна отклонению выходной величины от заданного значения, интегралу отклонения выходной

величины от заданного значения и первой производной по времени отклонения выходной величины от заданного значения:

$$u = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (8)$$

Закон управления выбирается в зависимости от свойств объекта управления.

В основе построения систем автоматического управления лежат общие фундаментальные принципы управления. В настоящее время используются три основных принципа управления: *разомкнутого управления, компенсации возмущения и управления по отклонению.*

**Принцип разомкнутого управления** заключается в том, что алгоритм управления строится только на основе алгоритма функционирования путем выбора законов, определяющих действие управляющего устройства с учетом свойств объекта управления. Здесь не учитывается фактическое значение управляемой величины и действие возмущений. Алгоритм функционирования может задаваться отдельным устройством.

**Принцип компенсации возмущения (принцип управления по возмущению, принцип Понселе-Чиколева)** заключается в том, что управляющее воздействие формирует управляющее воздействие таким образом, чтобы компенсировать действие возмущения на объект управления. Данный принцип позволяет компенсировать действие возмущения, которое может быть измерено, причем для каждого вида возмущения необходимо использовать отдельное компенсирующее устройство.

**Принцип управления по отклонению (принцип обратной связи, принцип управления по замкнутому контуру)** заключается в том, что управляющее воздействие формируется только при отклонении управляемой величины от заданного ее значения. Алгоритм управления формируется блоком управления после сравнения заданного алгоритма функционирования и фактического значения выходной величины объекта управления. Для этого в схему вводят дополнительную связь с выхода объекта управления в блок управления, эта дополнительная связь называется *обратной связью*. Преимущество данного принципа управления обуславливается наличием обратной связи.

**Обратная связь** – передача сигнала или его части обратно на вход элемента или обратно на вход любого из предыдущих элементов. В данном принципе управления сигнал с выхода объекта управления подается обратно на вход блока управления, т.е. как бы замыкает контур управления. По своему действию обратная связь делится на несколько видов. Когда воздействие по цепи обратной связи складывается с задающим воздействием, то такая обратная связь называется *положительной*. Когда воздействие по цепи обратной связи вычитается из задающего воздействия, то такая обратная связь называется *отрицательной*. Системы, работающие по принципу управления по

отклонению, представляют собой системы с отрицательной обратной связью. Обратная связь, образуемая регулятором по отношению к объекту управления, называется *главной*. Обратные связи, которые могут быть в самом регуляторе, называются *местными*. Обратная связь, действующая в установившемся и переходном режимах, называется *жесткой*, действующая только в переходном режиме, называется *гибкой*.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Почему автоматизация является одним из главных направлений научно-технического процесса?
2. Какие операции называются рабочими, а какие – операциями управления?
3. Что называется механизацией и автоматизацией?
4. Что называется объектом управления? Каковы его свойства?
5. Какая система управления называется автоматизированной, а какая автоматической?
6. В каком случае система управления называется одномерной, а в каком – многомерной?
7. Что называется алгоритмом функционирования?
8. Какие алгоритмы функционирования Вы знаете, и в чем они заключаются?
9. Что называется законом управления?
10. Какие законы управления Вы знаете, и в чем они заключаются?
11. Какие принципы управления Вы знаете, и в чем они заключаются?

#### **2 Математическое описание линейных непрерывных систем управления**

##### **План:**

1. Функциональные элементы и схемы.
2. Математическое описание элементов и систем в статическом и динамическом режимах.
3. Соединение типовых динамических звеньев. Структурная схема.
4. Передаточная функция разомкнутой и замкнутой САУ.

1. Все системы управления состоят из отдельных элементов (устройств), которые выполняют определенные функции и называются **функциональными элементами (устройствами)**. По выполняемой функции все функциональные элементы можно разделить на следующие группы:

- **Задающие элементы (ЗЭ)** – служат для установки задания, вырабатывают эталонную величину  $x_0$ , с которой сравнивается фактическое значение управляемой величины  $y$ , задают алгоритм функционирования объекта управления.

- **Воспринимающие, измерительные, чувствительные элементы (ВЭ, ИЭ, ЧЭ)** – служат для получения информации о фактическом значении управляемой величины в виде сигнала определенной физической природы.

- **Элементы сравнения (ЭС)** – служат для сравнения задания  $x_0(t)$  и фактического значения управляемой величины  $y(t)$ , на выходе этого элемента

получается результат сравнения в виде:  $e = x_0 - y$ . Для этого обе сравниваемые величины должны иметь одинаковую физическую природу.

- **Управляющие элементы (УЭ)** - формируют сигнал управления  $u(t)$  согласно принятому алгоритму управления. **Исполнительные элементы (ИЭ)** – преобразуют сигнал управления в управляющее воздействие  $u^1(t)$  на объект управления через его регулирующий орган. Если регулирующий орган объекта управления требует механического перемещения, то такой исполнительный элемент называют *исполнительным механизмом (ИМ)* или *сервоприводом*.

- **Корректирующие элементы (КЭ)** – улучшают динамические свойства процесса регулирования и вводятся в состав САУ при обоснованной необходимости. Могут быть введены в любое место системы.

Каждый функциональный элемент выполняет элементарную функцию, которая заключается в получении, преобразовании и передаче информации в виде сигналов определенной физической природы. Для удобства анализа работы системы управления функциональные элементы представляют устройствами однонаправленного действия, то есть передающими сигнал в одном направлении: со входа на выход. Этим свойством обладает большинство реальных элементов автоматики.

Схема системы управления, представленная функциональными элементами и связями между ними, называется **функциональной схемой**.

Все функциональные элементы (за исключением элемента сравнения) имеют один вход и один выход и обозначаются на функциональных схемах прямоугольником внутри, которого в сокращенном виде указывается функция, выполняемая данным элементом (рисунок 1а). Элемент сравнения имеет два входа и один выход и на функциональных схемах обозначается окружностью (рисунок 1б).

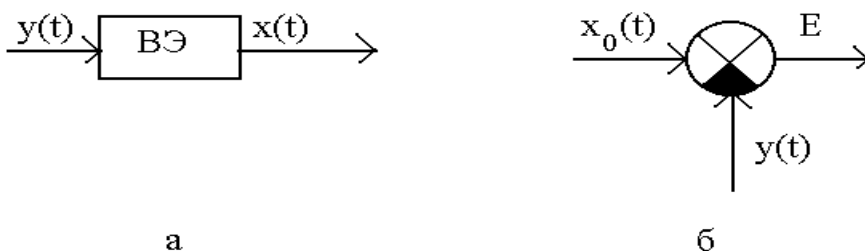


Рисунок 1 – Условные обозначения в функциональных схемах: а – функциональный элемент; б – элемент сравнения

Чтобы составить функциональную схему системы автоматического управления необходимо выделить функциональные элементы, их входные и выходные величины и представить их условными обозначениями, указав направление передачи сигнала от одного элемента к другому. Каждая линия соответствует обычно одному сигналу или одному воздействию. На

функциональной схеме, кроме названий функциональных элементов, указывают конкретные устройства, выполняющие соответствующие функции в системе автоматического управления, а также конкретные физические величины на входе и выходе каждого элемента. Функциональная схема является первым этапом формализации системы автоматического управления, выделяющая только те элементы и связи между элементами, которые составляют сущность автоматического управления.

2. По характеру изменения выходной величины во времени различают следующие режимы движения системы автоматического управления:

- *статический*;

- *динамический*.

**Статический режим** – состояние элемента или системы, при котором выходная величина не изменяется во времени, т.е.  $y(t) = const$ .

Очевидно, что статический режим (или состояние равновесия) может иметь место лишь тогда, когда входные воздействия постоянны во времени. Связь между входными и выходными величинами в статическом режиме описывают алгебраическими уравнениями.

**Динамический режим** – состояние элемента или системы, при котором входная величина непрерывно изменяется во времени, т.е.  $y(t) = var$ .

Динамический режим имеет место, когда в элементе после приложения входного воздействия происходят процессы установления заданного состояния или заданного изменения выходной величины. Эти процессы описываются в общем случае дифференциальными уравнениями.

Динамические режимы в свою очередь разделяются на:

- *неустановившийся (переходный)*;

- *установившийся (квазиустановившийся)*.

**Неустановившийся (переходный) режим** – режим, существующий от момента начала изменения входного воздействия до момента, когда выходная величина начинает изменяться по закону этого воздействия.

**Установившийся режим** – режим, наступающий после того, когда выходная величина начинает изменяться по такому же закону, что и входное воздействие, т. е. наступающий после окончания переходного процесса.

В установившемся режиме элемент совершает вынужденное движение. Очевидно, что статический режим является частным случаем установившегося (вынужденного) режима при  $x(t) = const$ .

Передаточные свойства элементов и САУ в статическом режиме описывают с помощью статических характеристик.

**Статическая характеристика элемента** – зависимость выходной величины  $y$  элемента от входной  $x$ :  $y = f(x) = y(x)$  в установившемся статическом режиме.

Статическая характеристика конкретного элемента может быть задана в аналитическом виде (например,  $y = kx^2$ ) или в виде графика. Как правило, связь между входной и выходной величинами – однозначная. Элемент с такой связью называют ***статическим (позиционным)***. Элемент с неоднозначной связью –

а статическим.

По виду статических характеристик элементы разделяют на:

- линейные;
- нелинейные.

**Линейный элемент** – элемент, имеющий статическую характеристику в виде линейной функции:  $y = b + ax$  (график 1 рисунка 2).

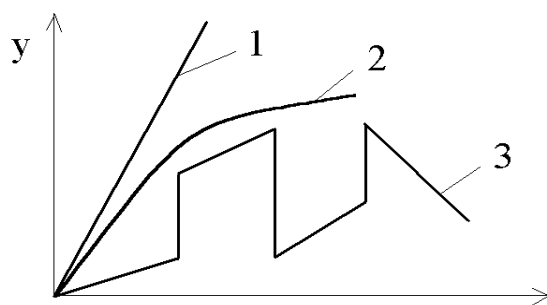


Рисунок 2 – Виды статических характеристик

**Нелинейный элемент** – элемент, имеющий нелинейную статическую характеристику. Нелинейная статическая характеристика аналитически обычно выражается в виде степенных функций, степенных полиномов, дробных рациональных функций и более сложных функций.

Нелинейные элементы в свою очередь подразделяют на:

- элементы с несущественно нелинейной статической характеристикой;
- элементы с существенно нелинейной статической характеристикой.

**Несущественно нелинейная (гладкая нелинейная) статическая характеристика** – характеристика, описываемая непрерывной дифференцируемой функцией. Практически это математическое условие означает, что график функции  $y = f(x)$  должен иметь гладкую форму (график 2 рисунка 2). В ограниченном диапазоне изменения входной величины  $x$  такая характеристика может быть приближенно заменена (аппроксимирована) линейной функцией. Приближенная замена нелинейной функции линейной называется **линеаризацией**. Линеаризация нелинейной характеристики правомерна, если в процессе работы элемента его входная величина меняется в небольшом диапазоне вокруг некоторого значения  $x = x_0$ . Наиболее простым способом линеаризации является метод осреднения, который применяется в случае, когда достаточно гладкая характеристика не может быть аппроксимирована аналитической функцией. Метод малых отклонений (приращений) основан на замене нелинейной характеристики  $y(x)$  в окрестностях точки  $O$  с координатами  $(x_0, y_0)$  прямой, касательной в этой точке. Если статическая характеристика описывается аналитической функцией, то линеаризация выполняется путем разложения функции  $y(x)$  в ряд Тейлора для выбранной точки разложения.



**Существенно нелинейная статическая характеристика** – характеристика, описываемая неоднозначной функцией или функцией, имеющей изломы или разрывы (график 3 рисунка 2).

Передаточные свойства элементов и систем в динамическом режиме описывают с помощью **динамических характеристик**.

Различают следующие формы динамических характеристик:

- *обыкновенное дифференциальное уравнение;*
- *временные характеристики;*
- *передаточная функция;*
- *частотные характеристики.*

• **Обыкновенное дифференциальное уравнение** является наиболее общей и полной формой описания передаточных свойств элементов и систем.

Для элемента имеющего один входной сигнал  $x(t)$  и один выходной  $y(t)$  обыкновенное дифференциальное уравнение в общем случае имеет вид:

$$\Phi[y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t); x(t), \dots, x^{(m)}(t), t] = 0, \quad (9)$$

где  $t$  – независимая переменная (обычно время).

Для реальных систем  $m \leq n$ .

Это уравнение динамики (движения) элемента. Движения в широком смысле слова, когда под движением понимается любое изменение сигналов.

Дифференциальное уравнение может быть:

- *линейное;*
- *нелинейное.*

**Линейное дифференциальное уравнение** – уравнение, в котором функция  $\Phi$  линейна по отношению ко всем ее аргументам, т.е. к  $y(t)$ ,  $y'(t)$ , ...,  $y^{(n)}(t)$ ;  $x(t)$ , ...,  $x^{(m)}(t)$ ,  $t$ .

**Нелинейное дифференциальное уравнение** – уравнение, в котором функция  $\Phi$  содержит произведения, частные, степени и т.д. переменных  $y(t)$ ,  $x(t)$  и их производных.

В функцию  $\Phi$  (*дифференциальное уравнение*) входят также величины, называемые **параметрами**. Они связывают между собой аргументы ( $y(t)$ ,  $y'(t)$ , ...,  $y^{(n)}(t)$ ;  $x(t)$ , ...,  $x^{(m)}(t)$ ,  $t$ ) и характеризуют свойства элемента с количественной стороны. Например, параметрами являются масса тела, активное сопротивление, индуктивность и емкость проводника и т.д.

Большинство реальных элементов описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, что значительно усложняет последующий анализ САУ. Поэтому стремятся перейти от нелинейных к линейным уравнениям вида:

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t). \quad (10)$$

Для всех реальных элементов выполняется условие  $m \leq n$ . Коэффициенты  $a_0, a_1 \dots a_n$  и  $b_0, b_1 \dots b_m$  в уравнении называются **параметрами**. Иногда параметры изменяются во времени, тогда элемент называют **нестационарным** или **с переменными параметрами**. Однако в дальнейших рассуждениях будем рассматривать только элементы с **постоянными** параметрами.

Если при составлении линейного дифференциального уравнения осуществлялась линеаризация статической характеристики элемента, то оно справедливо лишь для окрестности точки линеаризации и может записываться в отклонениях переменных. Однако, с целью упрощения записи, отклонения переменных в линеаризованном уравнении будем обозначать теми же символами, что и в исходном нелинейном уравнении, но без символа  $\Delta$ .

Важнейшим практическим достоинством *линейного* уравнения является возможность применения *принципа наложения*, согласно которому изменение выходной величины  $y(t)$ , возникающее при действии на элемент нескольких входных сигналов  $x_i(t)$ , равно сумме изменений выходных величин  $y_i(t)$ , вызываемых каждым сигналом  $x_i(t)$  в отдельности. Для упрощения записи линейных уравнений операцию дифференцирования заменяют символом  $p$  (оператором дифференцирования), а операцию интегрирования – символом  $\frac{1}{p}$ .

Получим операторную форму записи дифференциального уравнения:

$$a_0 p^n y(t) + a_1 p^{n-1} y(t) + \dots + a_n y(t) = b_0 p^m x(t) + b_1 p^{m-1} x(t) + \dots + b_m x(t), \quad (11)$$

запись которого можно упростить и представить в следующем виде:

$$a_0 p^n y(t) + a_1 p^{n-1} y(t) + \dots + a_n y(t) = b_0 p^m x(t) + b_1 p^{m-1} x(t) + \dots + b_m x(t) \quad (12)$$

- **Временные характеристики.**

Дифференциальное уравнение не дает наглядного представления о динамических свойствах элемента, но такое представление дает функция  $y(t)$ , т.е. решение этого уравнения. Однако одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, зависящих от начальных условий и характера входного воздействия  $x(t)$ , что неудобно при сопоставлении динамических свойств различных элементов. Поэтому характеризовать эти свойства элемента можно только *одним* решением дифференциального уравнения, полученным при *нулевых* начальных условиях и одним из *типовых* воздействий: единичном ступенчатом, дельта-функции, гармоническом, линейном (рисунок 3).

Под начальными условиями понимают значение выходной величины и всех ее производных в момент времени  $t = t_0$  при условии, что до этого времени внешние воздействия отсутствовали.

Начальные условия называются **нулевыми**, если выходная величина и все ее производные равны нулю т.е.  $y(0) = y'(0) = y''(0) = \dots = y^{(n)}(0) = 0$ .

**Ступенчатое воздействие** – воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до некоторого значения и далее остается постоянным (рисунок 3.3а).

Ступенчатому воздействию соответствует функция:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ L & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

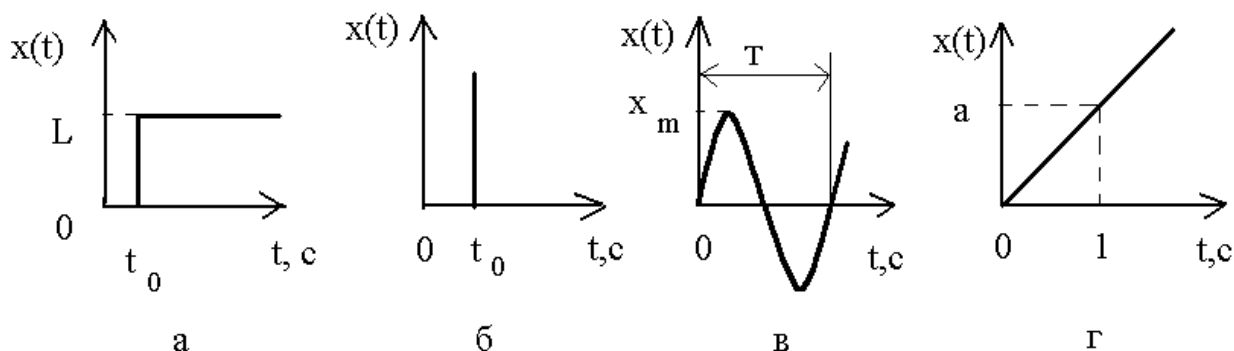


Рисунок 3 – Типовые воздействия: а – ступенчатое; б – импульсное; в – гармоническое; г – линейное

При анализе и расчете систем удобно использовать ступенчатое воздействие, у которого величина  $L = 1$ . Его называют **единичным ступенчатым воздействием** и обозначают  $1(t)$ . Математическое выражение, описывающее единичное ступенчатое воздействие, имеет вид:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (14)$$

Ступенчатое воздействие чаще всего используют при исследованиях систем стабилизации параметров, так как эти воздействия наиболее близки к реальным входным (задающим и возмущающим) воздействиям систем стабилизации. Реакция звена на единичную ступенчатую функцию при нулевых начальных условиях называется **переходной функцией**, которую принято обозначать  $h(t)$ . Графическое изображение переходной функции называют **переходной характеристикой**.

**Импульсное воздействие** – одиночный импульс прямоугольной формы (рисунок 3б), имеющий достаточно большую высоту и малую длительность (по

сравнению с инерционностью испытываемой системы) с площадью  $a\theta$ . При математическом анализе САУ используют **единичное импульсное воздействие** описываемое **дельта-функцией Дирака**:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \infty & \text{при } t > 0, \text{ причем } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Последние два выражения позволяют рассматривать дельта-функцию, как импульс, имеющий бесконечно большую высоту, бесконечно малую длительность и единичную площадь. Дельта-функцию можно определить также как производную единичного ступенчатого воздействия:  $\delta(t) = \frac{d\mathbf{1}(t)}{dt}$ .

Нормальная реакция звена на импульсную функцию называется **импульсной переходной функцией** или **весовой функцией (функцией веса)**, которую принято обозначать  $\nu(t)$ . Графическое изображение переходной функции называют **импульсной переходной характеристикой**.

**Гармоническое воздействие** – сигнал синусоидальной формы, описываемый функцией (рисунок 3.3в):

$$x(t) = x_m \sin \omega t, \quad (-\infty < t < \infty), \quad (16)$$

где  $x_m$  – амплитуда сигнала;

$\omega = 2\pi / T$  – круговая частота;

$T$  – период сигнала.

Гармонический сигнал, начинающий действовать в момент времени  $t = 0$ , описывают при помощи единичной ступенчатой функции:

$$x(t) = \mathbf{1}(t) x_m \sin \omega t, \quad (0 \leq t < \infty). \quad (17)$$

**Линейное воздействие** – воздействие, описываемое функцией:

$x(t) = \mathbf{1}(t) a_1 t$ ,  $(0 \leq t < \infty)$ , (рисунок 3г). Коэффициент  $a_1$  характеризует скорость нарастания воздействия  $x(t)$ .

• **Передаточная функция.**

Наиболее распространенным методом описания и анализа САУ является операционный метод, в основе которого лежит прямое интегральное преобразование Лапласа для непрерывных функций:

$$F(s) = Z \{ f(t) \} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt. \quad (18)$$

Это преобразование устанавливает соответствие между функцией действительной переменной  $t$  и функцией комплексного переменного  $s = \sigma + j\omega$ . Функцию  $f(t)$ , входящую в интеграл Лапласа, называют **оригиналом**, а результат интегрирования – функцию  $F(s)$  – **изображением** функции  $f(t)$  по Лапласу. Преобразование выполнимо лишь для функций, которые равны нулю при  $t < 0$ . Формально это условие в ТАУ обеспечивается умножением функции  $f(t)$  на единичную ступенчатую функцию  $1(t)$  или выбором начала отсчета времени с момента, до которого  $f(t) = 0$ .

Наиболее важными свойствами преобразования Лапласа при *нулевых* начальных условиях являются:

$$Z \{ f'(t) \} = sF(s); Z \{ \int f(t)dt \} = F(s) / s. \quad (19)$$

Операционный метод в ТАУ получил широкое распространение, так как с его помощью определяют так называемую **передаточную функцию**, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем.

Применяя прямое преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению, получим алгебраическое уравнение следующего вида:

$$D(s)Y(s) = K(s)X(s), \quad (20)$$

где  $D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n$  - *собственный оператор (характеристический полином (многочлен))*,  $K(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m$  - *входной оператор*.

Введем понятие передаточной функции.

**Передаточная функция** – отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}. \quad (21)$$

Тогда с учетом уравнения (12) и обозначений выражение для передаточной функции принимает вид:

$$W(s) = \frac{K(s)}{D(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (22)$$

Значение переменной  $s$ , при которой передаточная функция  $W(s)$  обращается в бесконечность, называется **полюсом передаточной функции**. Очевидно, что полюсами являются корни собственного оператора  $D(s)$ .

Значение переменной  $s$ , при которой передаточная функция  $W(s)$  обращается в нуль, называется **нулем передаточной функции**. Очевидно, что нулями являются корни входного оператора  $K(s)$ .

Если коэффициент  $a_0 \neq 0$ , то передаточная функция не имеет нулевого полюса ( $s = 0$ ), характеризуемый ей элемент называют **астатическим** и передаточная функция этого элемента при  $s = 0$  ( $t = \infty$ ) равна *передаточному коэффициенту*  $k = W(0) = \frac{b_m}{a_n}$ .

При чисто мнимом значении комплексного переменного  $s$  ( $s = j\omega$ ) передаточная функция называется частотной передаточной функцией и обозначается  $W(j\omega)$ .

По виду частотных характеристик все элементы делятся на две группы:

-минимально-фазовые;

-неминимально-фазовые.

**Минимально-фазовый элемент** – элемент, у которого все полюсы и нули передаточной функции  $W(s)$  имеют отрицательные действительные части.

• **Частотные характеристики.**

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и систем в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Они находят применение в ТАУ, так как реальные возмущения, а, следовательно, и реакции на них элемента или САУ могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.

Рассмотрим *сущность* и *разновидности* частотных характеристик. Пусть на вход линейного элемента (рисунок 4а) в момент времени  $t = 0$  подано гармоническое воздействие с частотой  $\omega$ :  $x(t) = x_m \sin \omega t$ . По завершении переходного процесса установится режим вынужденных колебаний и выходная величина  $y(t)$  будет изменяться по тому же закону, что и входная  $x(t)$ , но в общем случае с другой амплитудой  $y_m$  и с фазовым сдвигом  $\varphi$  по оси времени относительно входного сигнала (рисунок 4б):  $y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi)$ . Проведя аналогичный опыт, но при другой частоте  $\omega$ , можно увидеть, что амплитуда  $y_m$  и фазовый сдвиг  $\varphi$  изменились, т.е. они зависят от частоты. Можно убедиться также, что для другого элемента зависимости параметров  $y_m$  и  $\varphi$  от частоты  $\omega$  иные. Поэтому такие зависимости могут служить характеристиками динамических свойств элементов.

**Амплитудная частотная характеристика (АЧХ)** – зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты:

$$A(\omega) = \frac{y_{\max}}{x_{\max}}. \quad (23)$$

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты.

**Фазовая частотная характеристика ФЧХ** – зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты. ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент при различных частотах:

$$j(w) = j_2(w) - j_1(w), \quad (24)$$

где  $j_1(w)$  - фаза входного сигнала;  $j_2(w)$  - фаза выходного сигнала.

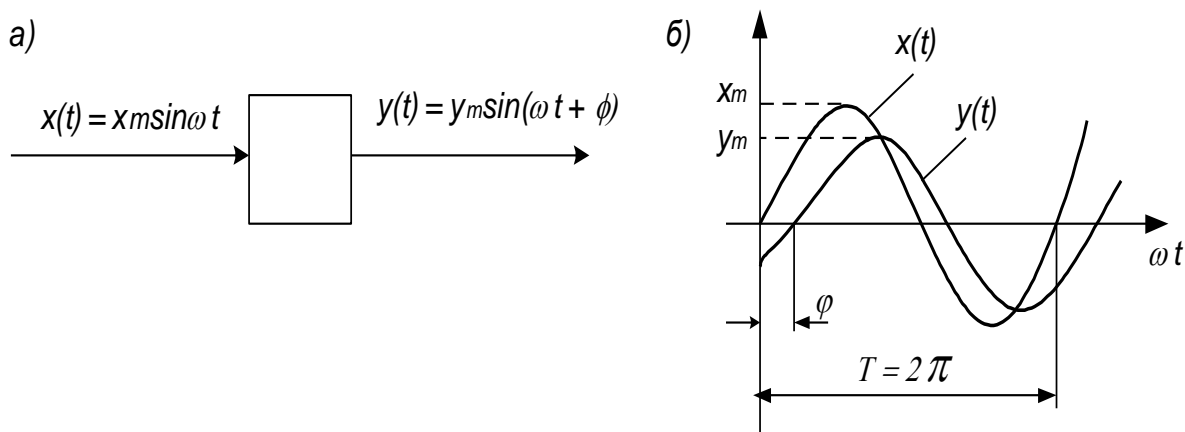


Рисунок 4 – Схема и кривые, поясняющие сущность частотных характеристик: а - линейный элемент с входным и выходным сигналом; б – соответствие входной и выходной величин

Амплитудную и фазовую характеристики можно объединить в одну общую характеристику – **амплитудно-фазовую характеристику (АФХ)**. АФХ в показательной форме представляет собой функцию комплексного переменного  $s = jw$ :

$$W(jw) = A(w) e^{j\varphi(w)}, \quad (25)$$

где  $A(w)$  – модуль функции;

$\varphi(w)$  – аргумент функции.

Каждому фиксированному значению частоты  $w_i$  соответствует комплексное число  $W(jw_i)$ , которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину  $A(w_i)$  и угол поворота  $\varphi(w_i)$ . Отрицательные значения

$\varphi(w)$ , соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительного направления действительной оси. При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор  $W(jw)$  поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно изменяется длина вектора. Кривая, которую при этом опишет конец вектора, и есть АФХ. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты.

Проекции вектора  $W(jw)$  на действительную и мнимую оси называют соответственно **вещественной (действительной)** и **мнимой частотными характеристиками (составляющими частотной передаточной функции)** и

обозначают  $Re(w)$ ,  $Jm(w)$  соответственно. Это позволяет записать АФХ в алгебраической форме:

$$W(jw) = Re(w) + j Jm(w). \quad (26)$$

АФХ, как и любую комплексную величину, можно также представить в тригонометрической форме:

$$W(jw) = A(w) \cos j(w) + j A(w) \sin j(w). \quad (27)$$

Связь между различными частотными характеристиками следующая:

$$A(w) = \zeta W(jw) \quad \zeta = \sqrt{Re^2(\omega) + Jm^2(\omega)}, \quad (28)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Jm(\omega)}{Re(\omega)}. \quad (29)$$

Минимально-фазовые элементы дают минимальный фазовый сдвиг  $\varphi(\omega)$  по сравнению с любыми другими элементами, имеющими такую же амплитудную характеристику  $A(\omega)$ , но у которой действительная часть хотя бы одного полюса или нуля положительна. Минимально-фазовые элементы обладают важным для практических расчетов свойством: их частотная передаточная функция полностью определяется одной из трех составляющих –  $A(\omega)$ ,  $Re(\omega)$  и  $Jm(\omega)$ . Это существенно упрощает задачи анализа и синтеза минимально-фазовых систем.

При практических расчетах САУ (без применения электронных вычислительных машин) удобно использовать частотные характеристики, построенные в логарифмической системе координат. Такие характеристики называют **логарифмическими**. Они имеют меньшую кривизну и поэтому могут быть приближенно заменены ломаными линиями, составленными из нескольких прямолинейных отрезков. Причем, эти отрезки в большинстве случаев удается построить без громоздких вычислений при помощи некоторых простых правил. Частоты, соответствующие точкам стыковки отрезков, называют *частотами излома* и обозначают  $\omega_i$ . Кроме того, в логарифмической системе координат легко находить характеристики различных соединений элементов, так как умножению и делению обычных характеристик соответствует сложение и вычитание ординат логарифмических характеристик.

За единицу измерения по оси частот логарифмических характеристик принимают декаду.

**Декада** – интервал частот, на котором частота изменяется в 10 раз (интервал частот, заключенный между произвольным значением частоты  $\omega_i$  и его десятикратным значением  $10\omega_i$ ).



Обычно в расчетах используют *логарифмическую амплитудную частотную характеристику (ЛАЧХ)*:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (30)$$

ординаты которой измеряют в логарифмических единицах величины *беллах (Б)* или *децибеллах (дБ)*.

**Бел** – единица измерения мощностей двух сигналов.

Если мощность одного сигнала больше (меньше) мощности другого сигнала в 10 раз, то эти мощности отличаются на 1 Б, ( $\lg 10 = 1$ ). Так как мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то при применении этой единицы для измерения отношения амплитуд перед логарифмом появляется множитель 2. Например, если на некоторой частоте  $A(\omega) = 100$ , то это означает, что мощности входного и выходного сигналов отличаются в  $100^2$  раз, т.е. на  $2 \lg 100 = 4$  Б или на 40 дБ, соответственно и  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 40$  дБ.

Наклон отрезков ЛАЧХ определяют в децибелах на декаду (дБ/дек), они имеют положительный и отрицательный наклон, кратный 20 дБ/дек. Масштаб построения ЛАЧХ – *логарифмический*.

Ось ординат может пересекать ось абсцисс в любом месте (т.к. нуль оси абсцисс лежит слева в минус бесконечности:  $\lg 0 = -\infty$ ), таким образом, чтобы охватывался необходимый диапазон частот.

*Логарифмическую фазо-частотную характеристику (ЛФЧХ)* строят в системе координат с такой же осью абсцисс, что и у ЛАЧХ, а по оси ординат в линейном масштабе угол  $j(\omega)$  в градусах или в радианах. ЛФЧХ обычно строят под ЛАЧХ так, чтобы можно было сопоставить изменение фазы с изменением амплитуды при одинаковых частотах. Масштаб построения ЛФЧХ – *полулогарифмический*.

На рисунке 5 показаны примеры построения частотных характеристик. ить характеристиками динамических свойств элементов.

В ТАУ наиболее часто используют следующие частотные характеристики:

- *амплитудная частотная характеристика (АЧХ); фазовая частотная характеристика (ФЧХ);*

- *амплитудно-фазовая характеристика (АФХ);*

- *логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ).*

3 Функциональные элементы, используемые в САУ, могут иметь самые различные конструктивное выполнение и принципы действия. Однако общность математических выражений, связывающих входные и выходные величины различных функциональных элементов, позволяет выделить ограниченное число так называемых **типовых звеньев**. Каждому типовому звену соответствует определенное математическое соотношение между входной и выходной величинами. Если это соотношение является *элементарным* (например, дифференцирование, умножение на постоянный

коэффициент), то и звено называется *элементарным*.

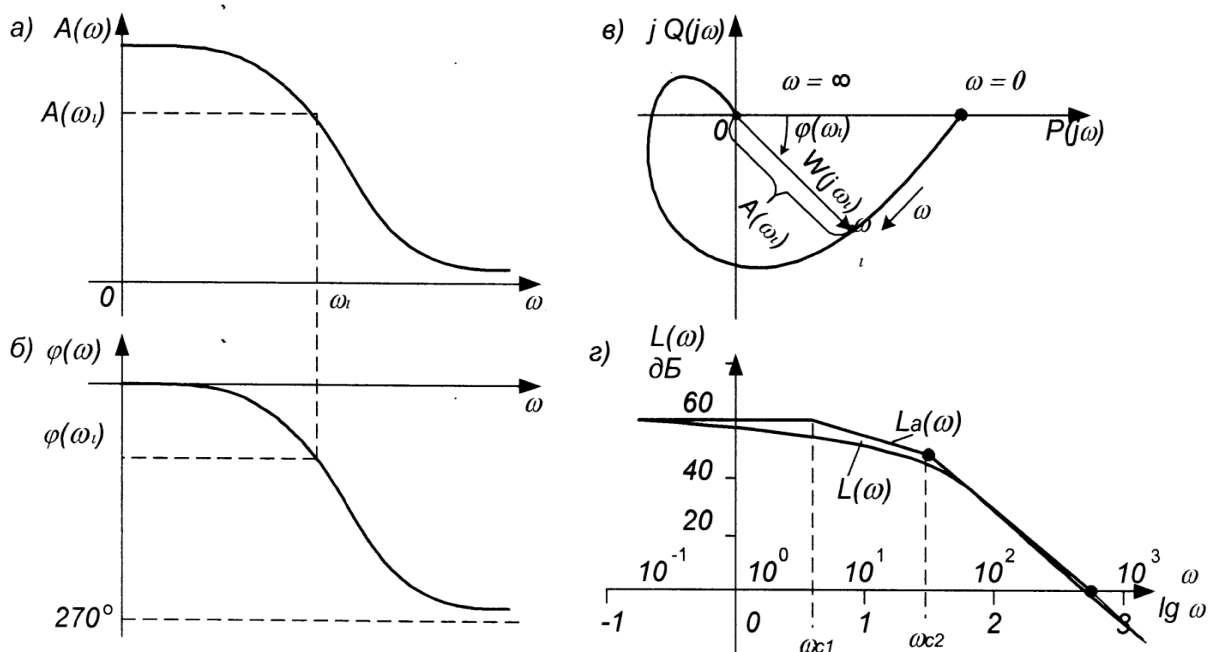


Рисунок 5 – Частотные характеристики: *а* – амплитудная; *б* – фазовая; *в* – амплитудно-фазовая; *г* – логарифмическая АЧХ

Звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, получили название **типовых динамических звеньев**.

Типовые динамические звенья являются основными составными частями схем САУ, поэтому знание их характеристик существенно облегчает анализ таких систем.

Классификацию типовых динамических звеньев удобно осуществить, рассматривая различные частные формы дифференциального уравнения:

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = b_0 \frac{dx(t)}{dt} + b_1 x(t). \quad (31)$$

Значения коэффициентов этого уравнения и названия для наиболее часто применяемых звеньев приведены в таблице 1.

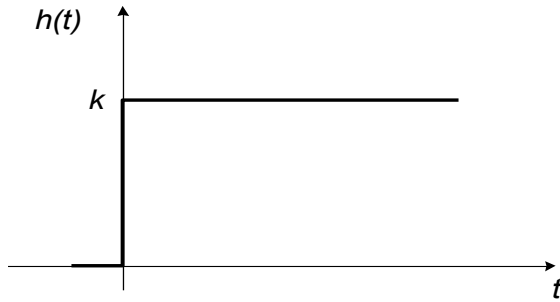
Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнения

№	Наименование звена	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	Примечание
1	Безинерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	$k$	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	$T$	1	0	$k$	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$T_2^2$	$T_1$	1	0	$k$	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	$T_2^2$	$T_1$	1	0	$k$	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	$k$	
6	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	$k$	0	
7	Реальное дифференцирующее	0	$T$	1	$k$	0	

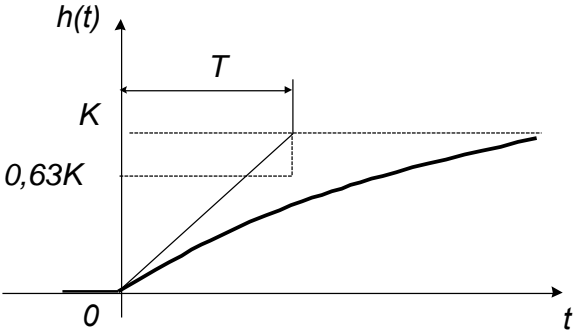
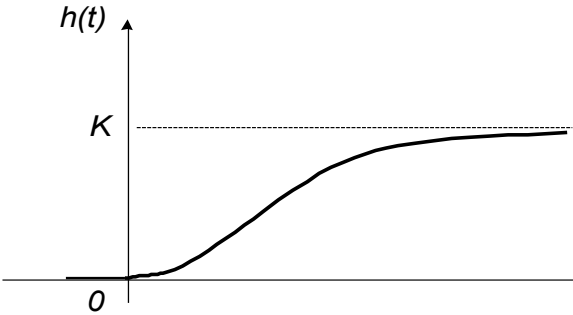
Передаточные и переходные функции для наиболее часто применяемых звеньев приведены в таблице 2.

К элементарным звеньям можно отнести также следующие звенья:

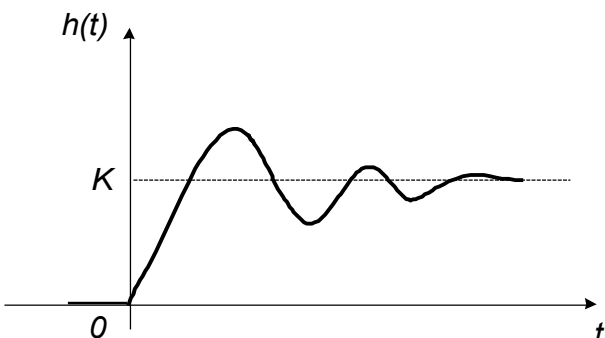
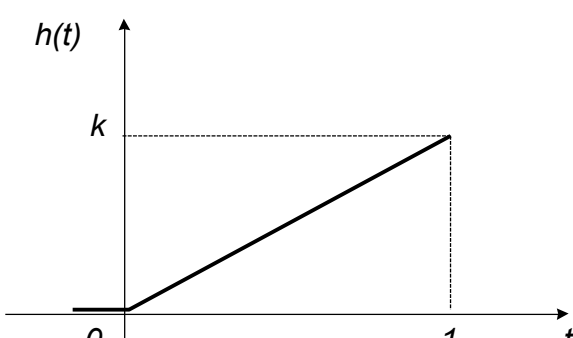

Таблица 2 – Передаточные и переходные функции наиболее часто применяемых звеньев

№	Наименование звена и описывающее его уравнение	Передаточная функция $W(s)$	Переходная функция $h(t)$
1	2	3	4
1	Безынерционное (пропорциональное)  $y(t) = kx(t)$	$k$	$k1(t)$  

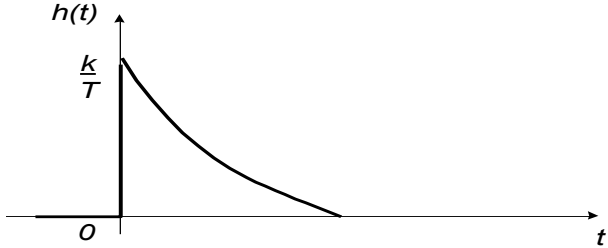
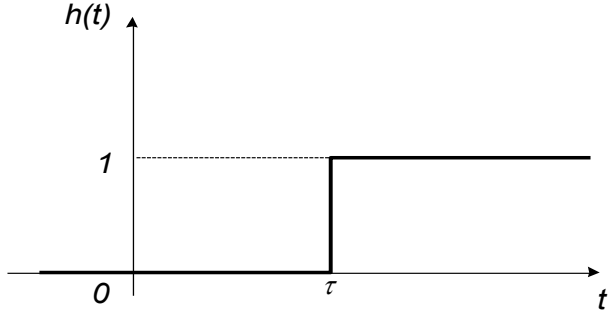
Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
2	<p>Инерционное 1-го порядка (апериодическое)</p> $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$\frac{k}{Ts + 1}$	$k(1 - e^{-t/T})1(t)$ 
3	<p>Инерционное 2-го порядка (апериодическое)</p> $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 \geq 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$ $T_1 \geq 2T_2$ <p>или</p> $\frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ <p>или</p> $\frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}$ $1 \ll \xi < \infty$	$k\left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4}\right)1(t),$ <p>где <math>T_3 + T_4 = T_1</math>; <math>T_3 T_4 = T_2^2</math>.</p> 

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
4	<p>Инерционное 2-го порядка (колебательное)</p> $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 < 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$ $T_1 < 2T_2$ <p>или</p> $\frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}$ $\xi > 1$	$k \left[ 1 - \frac{1}{\beta T_2} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi) \right] 1(t),$ <p>где <math>\beta = \sqrt{1 - \xi^2 / T_2}</math> ; <math>\varphi = \arccos \xi</math> ;  <math>\xi = T_1 / 2T_2</math>.</p> 
5	<p>Идеальное интегрирующее</p> $\frac{dy(t)}{dt} = kx(t)$	$\frac{k}{s}$	<p><math>kt1(t)</math></p> 
6	<p>Идеальное дифференцирующее</p> $y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	$ks$	<p><math>k\delta(t)</math></p> 

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
7	<p>Реальное дифференцирующее</p> $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	$\frac{ks}{Ts+1}$	$\frac{k}{T} e^{-t/T}$ 
8	<p>Звено запаздывания</p> $y(t) = x(t - \tau)$	$e^{-s\tau}$	$1(t - \tau)$ 

- консервативное звено с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + 1}; \quad (32)$$

- интегрирующее звено с замедлением с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}; \quad (33)$$

- изодромное звено с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{s}(Ts + 1) \quad (34)$$

- форсирующее звено первого порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = Ts + 1; \quad (35)$$

-форсирующее звено 2-го порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = k(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) \text{ при } T_1 < 2T_2. \quad (36)$$

В случае, когда  $T_1 \geq 2T_2$  данное звено не относится к разряду элементарных и может быть представлено следующей передаточной функцией:

$$W(s) = (T_1 s + 1)(T_2 + 1). \quad (37)$$

Для получения частотных характеристик типового звена используются их передаточные функции.

Для анализа САУ используются их *структурные схемы*. Схема системы управления, в которой функциональные элементы представлены типовыми динамическими звеньями, называется **структурной схемой**. На структурных схемах все воздействия следует представлять в виде лапласовых изображений. Для упрощения (свертывания) сложных структурных схем применяют правила их преобразования. Основным условием преобразования структурных схем в эквивалентную является неизменность динамических характеристик системы.

Три главных правила относятся к трем типовым соединениям звеньев:

- последовательному;
- параллельному;
- параллельно-встречному.

Если эти соединения состоят из элементов направленного действия, то каждое такое соединение может быть заменено одним элементом, статические и динамические характеристики которого эквивалентны свойствам соединения.

Рассмотрим эти типовые соединения звеньев при известности их передаточных функций.

• **Последовательное соединение звеньев** - это такое соединение двух или более звеньев, при котором выходная величина предыдущего звена является входной величиной последующего (рисунок 6)

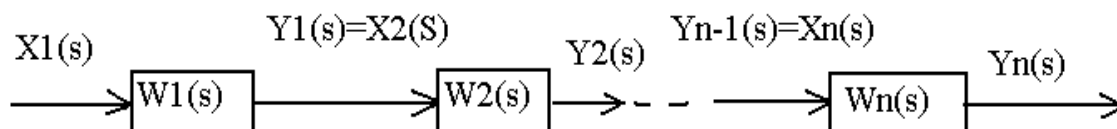


Рисунок 6 – Последовательное соединение динамических звеньев

Найдем передаточную функцию  $W(s)$  звена, эквивалентного последовательному соединению звеньев. Искомая передаточная функция эквивалентного звена:

$$W(s) = \frac{Y_n(s)}{X_1(s)} = \frac{Y_n(s)}{X_n(s)} \cdot \frac{X_n(s)}{X_{n-1}(s)} \cdot \dots \cdot \frac{X_2(s)}{X_1(s)} = \frac{Y_n(s)}{X_n(s)} \cdot \frac{Y_{n-1}(s)}{X_{n-1}(s)} \cdot \dots \cdot \frac{Y_1(s)}{X_1(s)} =$$

$$W_n(s) \cdot W_{n-1}(s) \cdot \dots \cdot W_1(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s).$$
(38)

Частотная передаточная функция последовательного соединения звеньев:

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)} = e^{j\sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)} \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$$
(39)

Из этого выражения вытекает, что при последовательном соединении звеньев их АЧХ перемножаются, а ФЧХ складываются.

При использовании логарифмических частотных характеристик, то для последовательного соединения:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = \sum_{i=1}^n 20 \lg A_i(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega),$$
(40)

то есть ЛАЧХ последовательного соединения звеньев равна сумме их ЛАЧХ.

Статическая характеристика в этом случае будет линейной, а угол ее наклона к оси абсцисс:

$$\alpha = \arctg k.$$
(41)

• **Параллельное соединение звеньев** – это такое соединение двух или более звеньев, при котором входная величина всех звеньев одна и та же, а их выходные величины складываются (рисунок 7).

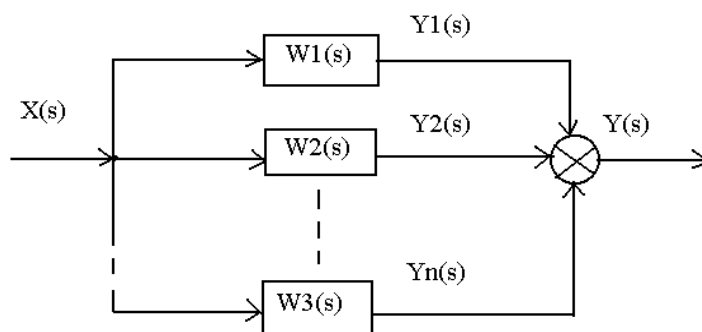


Рисунок 7 – Параллельное соединение динамических звеньев

Найдем передаточную функцию  $W(s)$  звена, эквивалентного параллельному соединению звеньев. Искомая передаточная функция



ЭКВИВАЛЕНТНОГО ЗВЕНА:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i(s)}{X(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i(s)}{X_i(s)} = \sum_{i=1}^n W_i(s). \quad (42)$$

Частотная передаточная функция параллельного соединения:

$$W(j\omega) = \sum_{i=1}^n W_i(j\omega). \quad (43)$$

Вектор АФХ параллельного соединения для каждой частоты равен сумме векторов АФХ звеньев, входящих в соединение, следовательно, проекция вектора соединения на вещественную и мнимую оси соответственно равны сумме проекций отдельных векторов, значит:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega) &= \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}_i(\omega), \\ \operatorname{Im}(\omega) &= \sum_{i=1}^n \operatorname{Im}_i(\omega), \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

на основании этого можно записать:

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)}, \\ \varphi(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Для построения статической характеристики параллельного соединения звеньев, статические характеристики которых известны, необходимо построить эти характеристики в одной системе координат и сложить их ординаты для одинаковых значений входной величины.

• **Параллельно-встречное соединение звеньев (встречно-параллельное соединение звеньев, соединение звеньев с обратной связью)**

- это такое соединение звеньев, при котором выходная величина одного звена подается обратно на его вход через другое звено (рисунок 8).

Найдем передаточную функцию  $W(s)$  звена, эквивалентного параллельно-встречному соединению звеньев. Выходная величина параллельно встречного соединения звеньев может быть найдена исходя из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} y &= \phi_n \varepsilon = \phi_n (x \mp y_0), \\ y_0 &= \phi_{oc}, \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

где  $\phi_n$ ,  $\phi_{oc}$  – статические характеристики звеньев прямой цепи и цепи обратной связи соответственно.

После решения этой системы уравнений относительно  $u$  и представления звеньев их передаточными функциями получим:

$$Y(s) = \frac{W_n(s)}{1 \pm W_n(s)W_{oc}(s)} X(s), \quad (47)$$

где  $W_n(s)$  и  $W_{oc}(s)$  – передаточные функции соответственно прямой цепи и цепи обратной связи параллельно-встречного соединения звеньев.

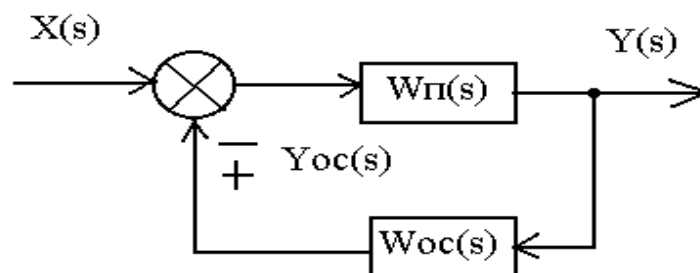


Рисунок 8 – Параллельно-встречное соединение динамических звеньев

После деления обеих частей равенства на  $X(s)$  получаем:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n(s)}{1 \pm W_n(s)W_{oc}(s)}, \quad (48)$$

учитывая, что:  $W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$  получаем передаточную функцию параллельно-встречного соединения:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n(s)}{1 \pm W_n(s)W_{oc}(s)} \quad (49)$$

При отрицательной обратной связи в знаменателе передаточной функции ставится знак плюс, при положительной обратной связи – знак минус.

Частотная передаточная функция параллельно-встречного соединения звеньев:

$$W(j\omega) = \frac{W_n(j\omega)}{1 \pm W_n(j\omega)W_{oc}(j\omega)}. \quad (50)$$

В случае, когда  $W_{oc}(s) = 1$  обратная связь называется *единичной*, а

передаточная функция параллельно-встречного соединения звеньев с единичной обратной связью будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n(s)}{1 \pm W_n(s)}. \quad (51)$$

Частотная передаточная функция параллельно-встречного соединения звеньев с единичной обратной связью:

$$W(j\omega) = \frac{W_n(j\omega)}{1 \pm W_n(j\omega)} = \operatorname{Re}(\omega) + j\operatorname{Im}(\omega). \quad (52)$$

Для частотных функций параллельно-встречного соединения звеньев нет простых аналитических выражений связи с частотными функциями входящих в соединение звеньев, то на практике для отыскания вещественной и мнимой составляющих АФХ соединения, имеющих практическое значение, пользуются специальными номограммами.

С помощью рассмотренных правил удастся преобразовать (упростить) к простейшему виду любую структурную схему, не содержащую *перекрестных связей* между звеньями. Если же схема многоконтурная и содержит перекрестные связи, то эти правила можно применять лишь после устранения этих перекрестных связей. Для устранения перекрестных связей следует использовать ряд вспомогательных правил преобразований структурных схем, которые приведены в таблице 3.

Могут также использоваться и другие частные правила преобразования структурных схем.

3. Передаточные функции САУ составляют по ее структурной схеме. С целью упрощения структурной схемы и приведения ее к виду, удобному для исследования, схему преобразуют, пользуясь правилами преобразования и учитывая виды связей звеньев в структурной схеме. Структурную схему приводят к виду, показанному на рисунке 9, где  $W1(s)$  – передаточная функция объекта управления;  $W0(s)$  – передаточная функция воспринимающего элемента и  $W2(s)$  – передаточная функция элементов, формирующих управляющее воздействие на объект управления. В линейных системах справедлив принцип суперпозиции, то есть независимость каждого воздействия на объект, и влияние всех воздействий суммируется. Для расчетов обычно используют передаточную функцию разомкнутой системы и передаточные функции замкнутой системы относительно задающего и возмущающего воздействий.

### **Передаточная функция разомкнутой системы.**

В данном случае при определении передаточной функции системы контур регулирования предполагают разомкнутым около элемента сравнения, как показано на рисунке волнистыми линиями. Передаточная функция разомкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = W_1(s)W_2(s)W_3(s) \quad (53)$$

Таблица 3 – Вспомогательные правила преобразования структурных схем

№	Операция	Исходная схема	Преобразованная схема
1	Перестановка узлов разветвления		
2	Перестановка сумматоров		
3	Перенос узла разветвления через звено вперед		
4	Перенос узла разветвления через звено назад		
5	Перенос сумматора через звено вперед		
6	Перенос сумматора через звено назад		

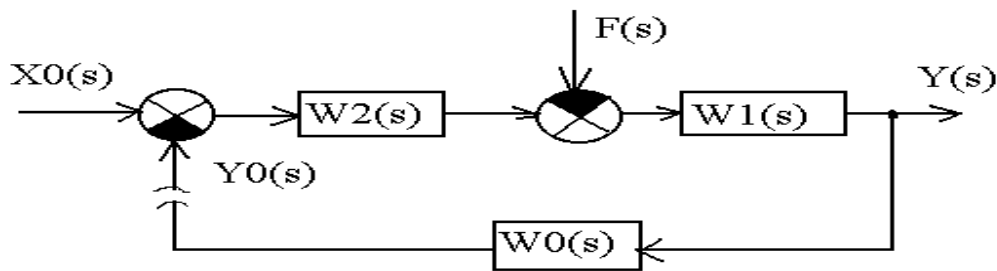


Рисунок.9 – Структурная схема САУ

Данная передаточная функция характеризует собственные динамические свойства системы, используется для получения характеристического многочлена разомкнутой и замкнутой САУ.

**Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия** определяется в предположении, что на систему оказывает влияние, только задающее воздействие, а другие воздействия отсутствуют, т.е.  $f(t)=0$ . Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия будет иметь вид:

$$W_x(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W1(s)W2(s)}{1+W1(s)W2(s)W0(s)} = \frac{W1(s)W2(s)}{1+W(s)} \quad (54)$$

Передаточная функция  $W_x(s)$  характеризует передачу системой задающего воздействия и его воспроизведение регулируемой величиной.

**Передаточная функция замкнутой системы относительно возмущающего воздействия** определяется в предположении, что на систему оказывает влияние, только возмущающее воздействие, а другие воздействия отсутствуют, то есть  $x0(t)=0$ . Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия будет иметь вид:

$$W_f(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W1(s)}{1+W1(s)W2(s)W0(s)} = \frac{W1(s)}{1+W(s)}. \quad (55)$$

Передаточная функция  $W_f(s)$  показывает влияние возмущения  $f(t)$  на регулируемую величину  $y(t)$ . Возмущение отклоняет регулируемую величину от заданного значения и понижает точность воспроизведения задающего воздействия, оказывая вредное влияние на процесс регулирования. Степень этого влияния определяется величиной  $W_f(s)$ : чем ближе эта величина к нулю, тем меньше влияние.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение функционального элемента и классифицируйте их по выполняемым функциям.

2. Какая схема называется функциональной схемой?
3. Сколько входов и выходов имеют функциональные элементы?
4. Как на функциональных схемах обозначаются функциональные элементы?
5. Что отражается на функциональных схемах?
6. Как описываются элементы и системы в статическом режиме? В динамическом режиме?
7. Какие Вы знаете типовые воздействия?
8. Какие условия называют начальными?
9. Какие начальные условия называют нулевыми начальными условиями, а какие ненулевыми начальными условиями?
10. Дайте определение передаточной функции и частотной передаточной функции.
11. Какие Вы знаете частотные характеристики. Как они строятся?
12. Какой масштаб называют логарифмическим, а какой полулогарифмическим?
13. Запишите формулы для передаточных функций типовых динамических звеньев.
14. Какая схема САУ называется структурной?
15. Назовите три главных правила преобразования структурных схем (без перекрестных связей между звеньями).
16. Запишите формулы, по которым можно определить эквивалентную передаточную функцию: последовательного, параллельного и параллельновстречного соединения звеньев.
17. Как определяются частотные характеристики: последовательного, параллельного и параллельно-встречного соединения звеньев.
18. Назовите вспомогательные правила преобразования структурных схем (с перекрестными связями между звеньями).
19. По какой формуле определяется передаточная функция разомкнутой САУ?
20. По какой формуле определяется передаточная функция замкнутой САУ относительно задающего воздействия?
22. По какой формуле определяется передаточная функция замкнутой САУ относительно возмущающего воздействия?

### 3 Устойчивость систем автоматического управления

#### **План:**

1. Понятие устойчивости САУ.
2. Методы (способы) определения устойчивости: экспериментальный и аналитические (теоретические).
3. Алгебраические критерии устойчивости.
4. Частотные критерии устойчивости.
5. Область устойчивости САУ.
6. Запас устойчивости.

7. Влияние звена чистого запаздывания на устойчивость САУ.
8. Показатели качества управления САУ.
9. Особенности анализа нелинейных САУ.

1. САУ предназначенная для управления каким-либо процессом или агрегатом должна быть работоспособна, также должна обладать свойствами, удерживающими параметры в таких пределах, чтобы не происходило существенных нарушений технологического процесса или работы агрегата. Работоспособность системы определяется ее устойчивостью.

**Устойчивость** – это способность системы возвращаться в исходное или близкое ему состояние после снятия ограниченных возмущающих или управляющих воздействий на систему.

**Неустойчивая САУ** не возвращается в состояние равновесия, а непрерывно удаляется от него. Система, не обладающая устойчивостью, вообще не способна выполнять функции управления и имеет нулевую или даже отрицательную эффективность. Неустойчивая система может привести управляемый объект в аварийное состояние. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из главных в теории автоматического управления.

Рассмотрим причины неустойчивости САУ. Неустойчивость САУ возникает, как правило, из-за неправильного (*положительного*) или очень *сильного* действия главной обратной связи. В результате чего в систему в режиме гармонических колебаний непрерывно поступает (закачивается) энергия. Энергия системы увеличивается, а значит, увеличиваются и связанные с ней режимные параметры, например, регулируемая величина. Такое явление получило название **резонанса**.

Причинами неправильного действия главной обратной связи САУ являются:

- выполнение главной обратной связи САУ по ошибке *положительной*

вместо отрицательной, что практически при любых параметрах делает систему неустойчивой.

- значительная *инерционность* элементов замкнутого контура САУ (например, объекта управления), из-за которой в режиме колебаний системы сигнал главной обратной связи (например, управляемая величина) значительно отстает от входного сигнала (например, управляющего воздействия) и оказывается с ним в фазе. Это означает, что связь, выполненная конструктивно как отрицательная, в динамическом режиме (режиме гармонических колебаний) начинает на определенной частоте действовать как положительная. Это ведет к раскачиванию системы и нарушению ее устойчивости.

Задачами анализа устойчивости САУ обычно являются:

- определение устойчивости или неустойчивости системы при заданных параметрах;

- определение допустимого по условиям устойчивости диапазона изменения некоторых заданных параметров системы;

- выяснение принципиальной возможности устойчивости системы при заданной ее структуре.

Свойства системы, позволяющие удерживать параметры технологических процессов или работы агрегатов в заданных пределах, характеризуют качество работы системы. Конкретные требования к поведению параметров выдвигаются практикой ведения процесса или условиями работы агрегата. Такие требования индивидуальны в каждом конкретном случае. Однако можно назвать ряд общих показателей качества работы системы. Которые позволяют почти всегда определить в ней требования к поведению параметров. Такими показателями являются: точность поддержания параметра в установившемся режиме работы системы или при стационарных случайных возмущениях, быстродействие системы, значение максимальных динамических отклонений в системе под действием возмущений.

2. В настоящее время для определения устойчивости САУ используются: экспериментальный и аналитические методы определения устойчивости.

**Экспериментальный метод** исследования можно применять при наличии действующей системы. В этом случае устойчивость и показатели качества определяются по изменению входной величины системы при подаче на вход типовых сигналов (единичного ступенчатого воздействия, короткого импульса, гармонического сигнала, стационарного случайного воздействия). Для осуществления этого метода исследования необходима аппаратура, способная с достаточной степенью точности регистрировать изменения входных и выходных воздействий системы.

**Аналитические (теоретические) методы** исследования основаны на анализе математической модели, описывающей работу системы. Математическая модель системы может быть представлена обыкновенными дифференциальными уравнениями, дифференциальными уравнениями в частных производных, интегральными уравнениями и т.д.

Рассмотрим САУ, математическая модель, которой представлена дифференциальным уравнение  $n$ -го порядка с постоянными коэффициентами (причем всегда  $m \leq n$ ):

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx(t)}{dt} + b_m x(t), \quad (56)$$

где  $a_0, \dots, a_n$  - постоянные коэффициенты собственного оператора системы;

$b_0, \dots, b_m$  - постоянные коэффициенты оператора воздействия.

После ввода алгебраического оператора дифференцирования  $p = \frac{d}{dt}$ , уравнение примет вид:



$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) y(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x(t) \quad (57)$$

Устойчивость и показатели качества САУ, можно оценить, анализируя изменения выходной величины во времени, полученные при решении дифференциального уравнения, если подставить в правую часть уравнения вместо  $x(t)$  различные типовые сигналы.

Дифференциальное уравнение можно решить традиционными методами интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Обычно решение этого уравнения при различных входных сигналах и начальных условиях вызывает определенные трудности. Поэтому в теории автоматического управления разработаны более простые методы оценки устойчивости и некоторых показателей качества работы систем. Определить устойчивость САУ, имея математическую модель, можно: по расположению корней характеристического уравнения, с помощью алгебраических и частотных критериев устойчивости.

При приложении к автоматической системе какого-нибудь ограниченного по значению и времени управляющего или возмущающего воздействия (рисунок 10а) ее движение может быть различным. Однако условие устойчивости определяет три основных вида движения систем:

- 1) движение устойчивой системы (рисунок 10б);
- 2) движение неустойчивой системы (рисунок 10в);
- 3) движение нейтральной системы (системы, находящейся на границе устойчивости) (рисунок 10г).

Рисунок показывает, что устойчивость системы определяется характером ее движения после прекращения действия входного воздействия (при  $t > t_0$ ).

Движение системы в период  $T$  характеризует дифференциальное уравнение

при  $x(t) = 0$ , то есть однородное уравнение:

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = 0, \quad (58)$$

где  $y(t)$  – свободная составляющая выходной величины.

Рисунок показывает, что устойчивость системы определяется характером ее движения после прекращения действия входного воздействия (при  $t > t_0$ ).

Движение системы в период  $T$  характеризует дифференциальное уравнение при  $x(t) = 0$ , то есть однородное уравнение:

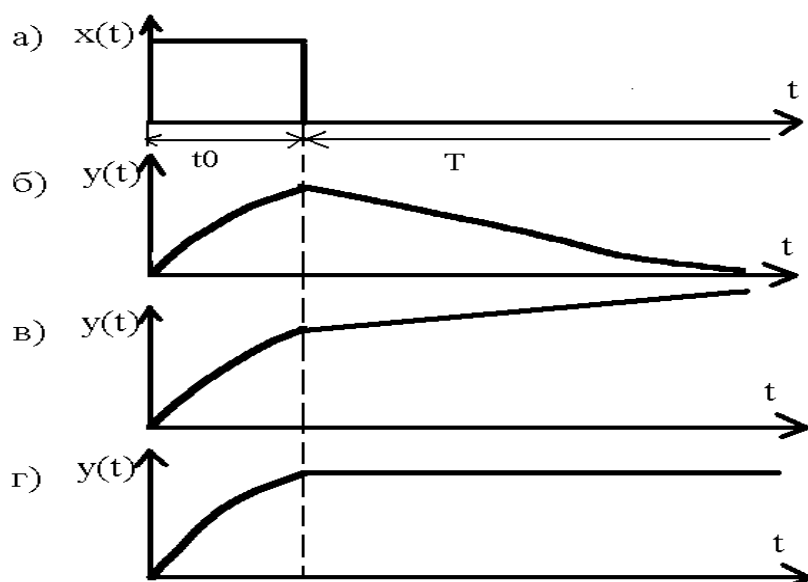


Рисунок 10 – К понятию устойчивости движения САУ

С математической точки зрения:

- **система устойчива**, если свободная составляющая  $y(t)$  переходного процесса с течением времени стремится к нулю;

- **система неустойчива**, если свободная составляющая  $y(t)$  переходного процесса с течением времени неограниченно возрастает;

- **система находится на границе устойчивости**, если свободная составляющая  $y(t)$  переходного процесса с течением времени не стремится ни к нулю, ни к бесконечности.

Решение этого уравнения с ненулевыми начальными условиями будет характеризовать устойчивость системы. Общее решение данного уравнения будет иметь вид:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda_i t} \quad (i = 1, 2, \dots, k, \dots, l, \dots, n), \quad (59)$$

где  $\lambda_i$  – корни характеристического уравнения  $a_0 \lambda^m + a_1 \lambda^{m-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0$ ;

$C_i$  – произвольные постоянные, определяемые начальными условиями системы.

Эта формула показывает, что характер движения автоматической системы зависит от корней характеристического уравнения  $\lambda$ . Корни могут быть вещественными и комплексными. Характер свободного движения всей системы будет определяться суммой свободных составляющих. Причем система будет устойчива только тогда, когда все вещественные корни отрицательны и все комплексные корни имеют отрицательные вещественные части. Если корни характеристического уравнения нанести в виде точек на комплексную плоскость (рисунок 11), то устойчивость линейной системы можно характеризовать положением корней. Система будет устойчивой в случае,

когда все корни характеристического уравнения будут находиться слева от мнимой оси (будут «левыми»), если хотя бы один из корней характеристического уравнения будет находиться справа от мнимой оси (будет «правым»), то система будет неустойчивой. Если характеристическое уравнение имеет нулевой корень или пару чисто мнимых корней, то система будет находиться на границе устойчивости, причем при наличии нулевого корня на апериодической границе устойчивости, а при наличии пары чисто мнимых корней на колебательной границе устойчивости.

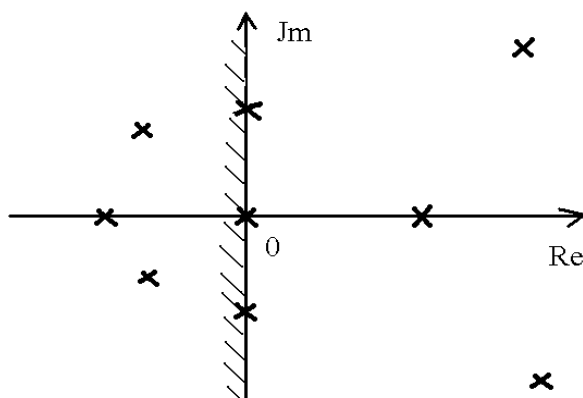


Рисунок 11 – Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

$$a_0(\lambda + \alpha_1)(\lambda + \alpha_2) \dots [(\lambda + \alpha_i)^2 + \omega_i^2] \dots (\lambda + \alpha_n) = 0. \quad (61)$$

Показанное выше свойство корней характеристического уравнения используется для установления необходимого условия устойчивости САУ.

Если известны все корни характеристического уравнения  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , то уравнение корней характеристического уравнения может быть представлено в виде:

$$a_0(l - l_1)(l - l_2) \dots (l - l_{n-1})(l - l_n) = 0. \quad (60)$$

В устойчивой системе все вещественные корни  $\lambda_i = -\alpha$ , а все комплексные корни  $\lambda_i = -\alpha \pm j\omega$ , тогда при подстановке корней (60) можно записать таким образом:

Очевидно, что при раскрытии скобок в этом уравнении все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительны.

**Необходимым условием устойчивости** является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения. Таким образом, если в характеристическом уравнении хотя бы один коэффициент отрицательный или

равен нулю, система неустойчива.

Для уравнений первого и второго порядка условие положительности коэффициентов характеристического уравнения является **необходимым и достаточным условием устойчивости**, в чем легко убедиться, определив корни этих уравнений.

3. Нахождение корней характеристического уравнения при  $n > 4$  задача весьма трудная, поэтому разработан ряд достаточных принципов, позволяющих определить устойчивость САУ, не находя корни характеристического уравнения, которые называются *критериями устойчивости*. Критерии устойчивости делятся на: алгебраические и частотные критерии устойчивости.

*Алгебраическими критериями устойчивости* называются такие условия устойчивости, которые позволяют определять устойчивость САУ с помощью простых арифметических действий: сложения, вычитания, умножения и деления. Алгебраические критерии устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности вещественных частей корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения системы.

**Критерий Рауса (1875-1877 г).**

Для характеристического уравнения вида:

$$D(s) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0 \quad (62)$$

необходимо заполнить таблицу Рауса, содержащую  $(n+1)$  строк, где  $n$  – степень характеристического уравнения. В первой строке таблицы записываются коэффициенты характеристического уравнения с четными индексами в порядке их возрастания, начиная с  $a_0$ . Во второй строке таблицы записываются коэффициенты характеристического уравнения с нечетными индексами в порядке их возрастания, начиная с  $a_1$ .

$a_0$	$a_2$	$a_4$	$a_6$	...
$a_1$	$a_3$	$a_5$	$a_7$	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...

Любой из остальных коэффициентов таблицы определяют по формуле:

$$C_{k,i} = C_{k+1,i-2} - r_i C_{k+1,i-1}, \quad (63)$$

где  $r_i = \frac{C_{1,i-2}}{C_{1,i-1}}$ ,  $k$  – номер столбца таблицы,  $i$  – номер строки таблицы.

После заполнения таблицы Рауса можно судить об устойчивости САУ. По критерию Рауса: ***для того, чтобы САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса***

имели знак одинаковый со знаком  $a_0$  и при  $a_0 > 0$  были бы положительны. Если хотя бы один из коэффициентов первого столбца таблицы Рауса имеет знак «-», то САУ неустойчива, по количеству смен знака у коэффициентов первого столбца таблицы можно судить о количестве «правых» корней характеристического уравнения.

**Критерий Гурвица (1895 г.)**

Для характеристического уравнения (60) из коэффициентов уравнения составляется главный определитель Гурвица по следующему правилу: по главной диагонали определителя сверху вниз и слева направо вписываются все коэффициенты характеристического уравнения от  $a_1$  до  $a_n$  в порядке возрастания индексов коэффициентов характеристического уравнения. Столбцы вверх от главной диагонали дополняют коэффициентами характеристического уравнения с последовательно возрастающими индексами, а столбцы вниз – коэффициентами характеристического уравнения с последовательно убывающими индексами. На место коэффициентов с индексами больше  $n$  и меньше нуля проставляются нули.

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

Очеркивая в главном определителе Гурвица Диагональные миноры, получаем определитель Гурвица более низкого порядка:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix};$$

.....

Номер определителя Гурвица определяется индексом коэффициента по главной диагонали, для которого составляется определитель. После составления всех определителей Гурвица необходимо найти их значение, т.к. согласно критерию Гурвица: для того, чтобы САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы все определители Гурвица имели знак одинаковый со

знаком  $a_0$  и при  $a_0 > 0$  были бы положительны. Легко убедиться в том, что  $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$ , т.к. в последнем столбце главного определителя лишь один из коэффициентов отличен от нуля ( $a_n \neq 0$ ), поэтому нет необходимости вычислять значение  $\Delta_n$ , т.к. условие  $\Delta_n > 0$  выполняется при условии при  $a_n > 0$  и  $\Delta_{n-1} > 0$ . В случае, когда  $\Delta_n = 0$  система находится на границе устойчивости, причем при  $a_n = 0$  система находится на апериодической границе устойчивости, а при  $\Delta_{n-1} = 0$  – на колебательной границе устойчивости.

Для САУ высокого порядка порядок определителей Гурвица возрастает и вычисление их значений становится трудоемким, поэтому критерий Гурвица применяется для определения устойчивости систем не выше четвертого-пятого порядка.

**4. Частотные критерии устойчивости** позволяют судить об устойчивости САУ по виду их частотных характеристик, т.е. частотные критерии определяют связь между устойчивостью системы и формой ее частотных характеристик.

#### Критерий Михайлова (1936-1938 г.).

Подставляя в характеристический полином:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n \quad (64)$$

чисто мнимое значение комплексного переменного  $s = j\omega$ , получаем комплексный полином:

$$D(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + a_2 (j\omega)^{n-2} + \dots + a_n = Re(\omega) + jIm(\omega) == D(\omega)e^{j\psi(\omega)} \quad (65)$$

где  $Re(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots$  - вещественная (действительная) составляющая комплексного полинома;

$Im(\omega) = \omega(a_{n-1} - a_{n-3}\omega^2 + a_{n-5}\omega^4 - \dots)$  - мнимая составляющая комплексного полинома;

$D(\omega)$  - модуль характеристического вектора  $D(j\omega)$ ;

$\psi(\omega)$  - фаза (аргумент) характеристического вектора  $D(j\omega)$ .

При изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности вектор  $D(j\omega)$ , изменяясь по величине и направлению, будет описывать своим концом в комплексной плоскости *годограф (кривую) Михайлова*. Для устойчивой системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения были «левыми» и должно выполняться условие:  $D(j\omega) \neq 0$ . Условие устойчивости САУ по критерию Михайлова можно сформулировать следующим образом: **для того чтобы САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова при изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности ( $0 < \omega < \infty$ ), начинаясь при  $\omega = 0$  на положительной вещественной полуоси, обходил строго против часовой стрелки**

последовательно  $n$  квадрантов комплексной плоскости и в квадранте с номером  $n$  уходил в бесконечность,  $n$  - степень характеристического уравнения (характеристический вектор должен монотонно

поворачиваться против часовой стрелки на угол  $\frac{\pi}{2}$ ). Для устойчивых систем  $n$ -го порядка годограф Михайлова имеет плавную спиралевидную форму. Признаком неустойчивости является: нарушение числа и последовательности пройденных годографом Михайлова квадрантов комплексной плоскости, вследствие чего угол поворота вектора  $D(j\omega)$

оказывается меньше, чем  $\frac{\pi}{2}$ . Если годограф Михайлова начинается в начале координат, то САУ находится на апериодической границе устойчивости, если годограф Михайлова проходит через начало координат, то САУ находится на колебательной границе устойчивости.

### **Критерий Найквиста (1932 г.).**

Позволяет судить об устойчивости замкнутой САУ по виду амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) разомкнутой САУ. Основой для определения устойчивости является следующее выражение:

$$\Phi(s) = \frac{W_{раз}(s)}{1 + W_{раз}(s)}, \quad (66)$$

где  $\Phi(s)$  – передаточная функция замкнутой САУ;  $W_{раз}(s)$  – передаточная функция разомкнутой САУ.

Зная, что  $W_{раз}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$  и подставив это выражение в уравнение передаточной функции замкнутой САУ, получим:

$$\Phi(s) = \frac{\frac{Y(s)}{X(s)}}{\frac{X(s) + Y(s)}{X(s)}}, \quad (67)$$

то есть:

$$1 + W_{раз}(s) = \frac{X(s) + Y(s)}{X(s)} = \frac{R(s)}{Q(s)}. \quad (68)$$

Числитель этого выражения представляет собой характеристический полином замкнутой САУ. Степень полиномов  $R(s)$  и  $Q(s)$  одинакова и равна  $n$ .

При определении устойчивости замкнутой САУ могут возникнуть два

случая: *первый случай* – разомкнутая САУ устойчива или находится на границе устойчивости; *второй случай* – разомкнутая САУ неустойчива и имеет  $L$  правых корней характеристического уравнения.

Определять устойчивость разомкнутой системы для определения ее принадлежности к первому или второму случаю можно по любому из приведенных выше критериев Рауса, Гурвица, Вышнеградского Михайлова. Это условие является обязательным при нахождении устойчивости замкнутой системы управления по критерию Найквиста.

Ниже рассмотрим пример определения устойчивости разомкнутой системы при помощи критерия Михайлова.

**Первый случай.** Систему, находящуюся на границе устойчивости, путем искусственного сдвига нулевых корней с последующим предельным переходом можно свести к устойчивой системе. При устойчивой разомкнутой системе полином  $Q(s)$  имеет только «левые» корни характеристического уравнения, поэтому в соответствии с критерием Михайлова:

$$\arg Q(j\omega) = \frac{\pi n}{2} \quad (69)$$

Для устойчивой замкнутой САУ необходимо, чтобы полином  $R(s)$  также имел только «левые» корни характеристического уравнения, а значит необходимо, чтобы:

$$\arg R(j\omega) = \frac{\pi n}{2}. \quad (70)$$

Тогда

$$\arg[1 + W_{раз}(j\omega)] = \arg R(j\omega) - \arg Q(j\omega) = 0. \quad (71)$$

Таким образом, *замкнутая САУ будет устойчива при устойчивой разомкнутой САУ или САУ, находящейся на границе устойчивости, если годограф амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы (годограф частотной передаточной функции разомкнутой САУ, годограф Найквиста) при изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности не должен охватывать точку с координатами  $(-1 ; j0)$* . Если годограф Найквиста охватывает точку с координатами  $(-1 ; j0)$ , то замкнутая САУ неустойчива.

**Второй случай.** При неустойчивой разомкнутой системе полином  $Q(s)$  имеет  $L$  «правых» корней характеристического уравнения, поэтому

$$\arg Q(j\omega) = \frac{\pi(n - 2L)}{2}. \quad (72)$$

Для устойчивой замкнутой САУ необходимо, чтобы полином  $R(s)$  имел



только «левые» корни характеристического уравнения. Тогда:

$$\arg[1 + W_{раз}(j\omega)] = \frac{\pi n}{2} - \frac{(n - 2L)\pi}{2} = \left(\frac{L}{2}\right)2\pi \quad (73)$$

Для второго случая можно сформулировать условие устойчивости замкнутой САУ по критерию Найквиста: **замкнутая САУ будет устойчива при неустойчивой разомкнутой САУ, если годограф Найквиста при изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности охватывает точку с координатами  $(-1 ; j0)$   $(L/2)$  раз в положительном направлении, где  $L$  – количество правых корней характеристического уравнения.**

При  $L = 0$  получаем условие первого случая как частный случай второго. Таким образом можно сформулировать общую формулировку критерия Найквиста: **замкнутая САУ будет устойчива, если годограф Найквиста при изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности охватывает точку с координатами  $(-1 ; j0)$   $(L/2)$  раз, где  $L$  – количество правых корней характеристического уравнения.**

Если годограф Найквиста проходит через точку с координатами  $(-1 ; j0)$ , то замкнутая САУ находится на колебательной границе устойчивости. Для определения устойчивости с помощью логарифмических частотных характеристик необходимо построить ЛФЧХ под ЛАЧХ и по их поведению судить об устойчивости САУ. Если частота среза ЛАЧХ  $\omega_c$  (частота при которой ЛАЧХ пересекает ось абсцисс) меньше чем частота пересечения ЛАЧХ фазы, равной  $-\pi$ , то система устойчива. Если частота среза ЛАЧХ  $\omega_c$  больше чем частота пересечения ЛАЧХ фазы, равной  $-\pi$ , то система неустойчива. Если частота среза ЛАЧХ  $\omega_c$  равна частоте пересечения ЛАЧХ фазы, равной  $-\pi$ , то система находится на колебательной границе устойчивости.

5. При помощи критериев устойчивости можно установить факт устойчивости или неустойчивости САУ, все параметры которой заданы. Однако часто при проектировании и наладке САУ возникает более общая задача анализа устойчивости – определение допустимых (по условию устойчивости) пределов изменения некоторых **варьируемых (регулируемых) параметров** системы. В качестве таких параметров обычно рассматривают коэффициенты и постоянные времени управляющего устройства (регулятора), которые можно *целенаправленно* изменять при настройке системы. Так как эти коэффициенты и постоянные времени однозначно определяют коэффициенты характеристического уравнения системы, то последние так же могут служить варьируемыми параметрами. Допустимые пределы варьирования параметров системы можно определить путем построения **областей устойчивости**.

**Область устойчивости САУ** – область в пространстве варьируемых параметров САУ, каждой точке которой соответствуют корни характеристического уравнения только с отрицательными действительными частями (располагающиеся в левой части комплексной плоскости). Область

устойчивости выделяет из всех возможных значений варьируемых параметров лишь те значения, при которых система устойчива. Поверхность, ограничивающая область устойчивости, называется **границей области устойчивости**. Все пространство вне области устойчивости называется **областью неустойчивости**. Если система в области варьируемых параметров не имеет области устойчивости, то такая система называется **структурно неустойчивой** и чтобы сделать ее устойчивой необходимо изменить ее структуру. Существуют общие рекомендации по влиянию на структурную устойчивость одноконтурной САУ:

- звенья, *уменьшающие инерционность* системы, *способствуют ее устойчивости* (например, форсирующее звено первого порядка);

- звенья, *увеличивающие инерционность* системы, *способствуют ее неустойчивости* (например, идеальные интегрирующее и колебательное звенья).

Вид области устойчивости и ее границы определяется числом варьируемых параметров. Так при одном варьируемом параметре  $\mu$  область устойчивости – отрезок прямой, а граница – точки  $\mu_1$  и  $\mu_2$  по концам этого отрезка, при двух варьируемых параметрах  $\mu$  и  $\alpha$  область устойчивости – часть плоскости этих параметров, при трех параметрах  $\mu$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  область устойчивости будет определяться в трехмерном пространстве. Если количество варьируемых параметров равно  $n$ , то область устойчивости строится в  $n$ -мерном пространстве, но для решения практических задач  $n$  обычно не превышает трех. Для отыскания границы области устойчивости можно воспользоваться одним из критериев устойчивости. Граница со стороны области устойчивости штрихуется, причем, штриховка наносится слева от прямой, отображающей границу устойчивости при изменении частоты  $\omega$  от нуля до плюс бесконечности. **Областью устойчивости** будет являться область, очерченная кривой, внутрь которой будет направлена штриховка.

6. Запас устойчивости характеризуется удалением параметров САУ от границы устойчивости. Нахождение САУ на границе устойчивости можно определить по критериям устойчивости. Запас устойчивости характеризуется удалением частотных характеристик САУ от критических точек.

Четкую количественную характеристику запаса устойчивости дает критерий Найквиста. Запас устойчивости по модулю можно определить по формуле:

$$\beta = \frac{1}{|W_{pas}(j\omega_{II})|} \quad (74)$$

где  $\omega_{II}$  – частота, при которой годограф Найквиста пересекает отрицательную ветвь вещественной оси.

Значение модуля АФХ разомкнутой САУ при постоянной  $\omega_{II}$  зависит от коэффициента усиления  $k$ , поэтому запас по модулю есть запас по усилению:

$$\beta = \frac{k_{пред}}{k} \quad (75)$$

где  $k_{пред}$  – значение коэффициента усиления, при котором  $|W_{раз}(j\omega) = 1|$  и САУ находится на границе устойчивости.

Запас устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$  определяется по дуге окружности единичного радиуса между отрицательной частью оси  $Re(\omega)$  и ближайшей точкой пересечения окружности с годографом Найквиста при частоте  $\omega_c$  (частоте среза).

На логарифмических характеристиках запас устойчивости по модулю определяется величиной  $\Delta L$ , на границе устойчивости  $\Delta L = 0$ , т.е.

$$\lg|W_{раз}(j\omega_{\Pi})| = 0. \quad (76)$$

Запас устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$  есть величина угла между ЛФЧХ и  $-\pi$ , при  $\omega = \omega_c$ , где  $\omega_c$  – частота среза (частота, при которой ЛАЧХ пересекает ось абсцисс). Запас по фазе обеспечивает сохранение устойчивости при увеличении запаздывания по фазе в системе и неизменном коэффициенте усиления системы. Запас устойчивости влияет на работоспособность САУ. В реальных системах запас устойчивости по модулю обычно составляет 15-20 дБ, а запас устойчивости по фазе 30 -50 .

7. Значительное число объектов управления описывается математической моделью, в состав которой входит звено чистого запаздывания, поэтому передаточная функция разомкнутой САУ со звеном чистого запаздывания имеет вид:

$$W_{раз}(s) = W_{раз}^1 e^{-st} \quad (77)$$

где  $W_{раз}^1(s)$  – передаточная функция линейных звеньев;

$e^{-st}$  – передаточная функция звена чистого запаздывания.

Звено чистого запаздывания не изменяет амплитуду АФХ, а создает дополнительный отрицательный сдвиг по фазе, зависящий от частоты.

Устойчивость системы с запаздыванием наиболее просто определять по критерию Найквиста, построив обычным образом годограф Найквиста и повернув каждую  $i$  – ю точку на угол  $\Delta\varphi = -\omega_i\tau$  по часовой стрелке. По поведению годографа Найквиста можно судить об устойчивости САУ с запаздыванием: **САУ будет устойчива в случае, когда годограф Найквиста будет охватывать точку с координатами  $(-1 ; j0)$   $\frac{L}{2}$  раз, где  $L$  – количество правых корней характеристического уравнения.**

Иногда необходимо установить значение запаздывания, при котором САУ находится на границе устойчивости. Это время запаздывания носит

названия *критического запаздывания*  $\tau_{кр}$ . Значение критического запаздывания можно определить следующим образом:

$$\varphi(\omega_c) + \omega_c \tau_{кр} = \pi, \quad (78)$$

откуда:

$$\tau_{кр} = \frac{\pi - \varphi(\omega_c)}{\omega_c} \quad (79)$$

где  $\omega_c$  – частота среза.

8. **Качество работы САУ** – совокупность свойств, обеспечивающих эффективное функционирование системы в целом. В свою очередь, *свойства, из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют показателями качества САУ*. Так САУ можно характеризовать такими показателями качества, как вес системы, ее габариты, стоимость, надежность, долговечность и т.п. Эти показатели характеризуют качество САУ в *широком* смысле. В ТАУ же показатели качества рассматривают, как правило, в более *узком* смысле: рассматривают только *статические* и *динамические свойства системы*, характеризующие *точность* поддержания управляемой величины  $x(t)$  на заданном уровне  $x_3(t)$  соответственно в установившихся и переходных режимах, т.е. характеризующие *эффективность процесса управления*. Для такого более узкого понимания качества САУ применяют термин «качество управления САУ». Иными словами:

**Качество управления САУ** – совокупность свойств САУ, характеризующих *точность* поддержания управляемой величины на заданном уровне в установившихся и переходных режимах. В свою очередь, *свойства, из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют показателями качества управления САУ*.

Рассмотрим понятие *точности САУ*. Для типовой одноконтурной САУ можно составить обобщенную структурную схему (рисунок 11). Объект управления характеризуется одной управляемой переменной  $X(p)$ , которую требуется стабилизировать на заданном уровне  $X_3(p)$ . На стабилизируемую переменную  $X(p)$  влияет возмущение  $X_B(p)$ . Отклонение стабилизируемой переменной  $X(p)$ , вызываемое этим возмущением компенсируется в системе целенаправленными изменениями управляющего воздействия  $Y(p)$ , которое создается регулятором (управляющим устройством). На входе регулятора с передаточной функцией  $W_P(p)$  действует сигнал рассогласования (ошибки)  $e(p)$ . Этот сигнал формируется в результате сравнения (алгебраического суммирования) задающего воздействия  $X_3(p)$  и управляемой величины  $X(p)$ . Согласно принципу наложения общее изменение выходной величины  $X(p)$ , возникающее при совместном действии входных воздействий  $X_3(p)$  и  $X_B(p)$ , равно сумме изменений, создаваемых каждым воздействием в отдельности. Отсюда **уравнение динамики САУ** в краткой записи:

$$X(p) = X_3(p)\Phi_3(p) + X_B(p)\Phi_B(p) \quad (80)$$

или в развернутом виде:

$$X(p) = X_3(p) \frac{W_p(p)W_0(p)}{1+W_p(p)W_0(p)} + X_B \frac{1}{1+W_p(p)W_0(p)} \quad (81)$$

Назначение САУ заключается в поддержании равенства:  $x(t) = x_3(t)$  при любых изменениях задающего и возмущающих воздействий. То есть САУ должна воспроизводить задающее воздействие  $x_3(t)$  и подавлять (компенсировать) действие возмущающих воздействий. Однако из-за инерционности объекта управления и регулятора обе эти функции выполняются САУ с *погрешностью (ошибкой)*  $\varepsilon(t) = x_3(t) - x(t)$ , которая и характеризует *точность* САУ. Чем *меньше* мгновенные значения ошибки  $\varepsilon(t)$ , тем *выше точность* САУ, то есть ее *качество*. Для типовой одноконтурной САУ, уравнение динамики в операторной форме для сигнала ошибки имеет вид:

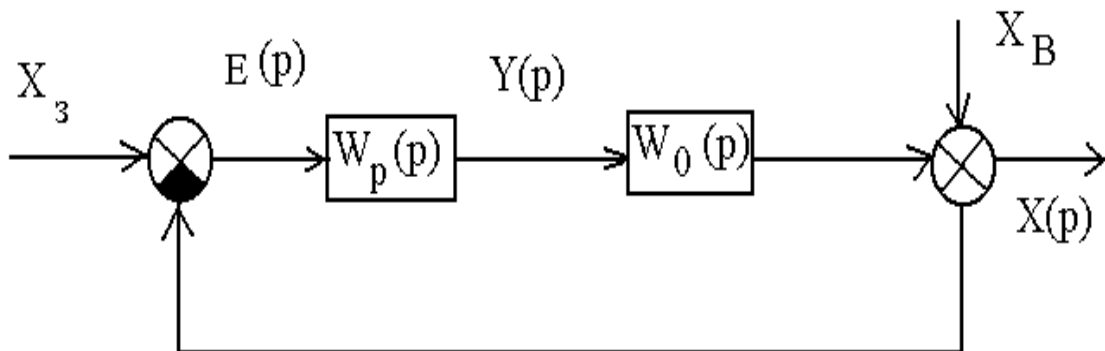


Рисунок 11 – Одноконтурная САУ

$$e(p) = X_3(p) - X(p). \quad (82)$$

Подставляя значение управляемой величины  $X(p)$  данное выше получаем:

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{1+W_p(p)W_0(p)} [X_3(p) - X_B(p)] \quad (83)$$

Из этого выражения следует, что чем больше усилительные свойства регулятора ( $W_p(p)$ ), тем ошибка  $\varepsilon(p)$ , а значит и  $\varepsilon(t)$  будет меньше и в статике и в динамике. Так как определение (вычисление) мгновенных значений ошибки

$\varepsilon(t)$  при произвольном законе изменения внешних воздействий представляет собой сложную задачу, то точность САУ (показатели качества управления) принято оценивать по ошибкам в: *статическом, установившемся динамическом и переходном* режимах работы САУ.

• В статическом режиме работы САУ ошибки возникают только в *статической* системе. *Статическая САУ* – система, объект управления и регулятор которой являются статическими элементами. У таких элементов в статическом режиме (т.е. при  $p = 0$ ):

$$W_o(0) = k_o; \quad W_p(0) = k_p, \quad (84)$$

где  $k_o, k_p$  – передаточные коэффициенты объекта управления и регулятора.

Учитывая значения передаточных функций, получаем в статическом режиме ошибку:

$$\varepsilon(0) = \frac{1}{1 + k_p k_o} [X_z(0) - X_B(0)] \quad (85)$$

Анализ этого выражения позволяет сделать следующий вывод: *точность САУ в статическом режиме тем выше, чем больше передаточный коэффициент ( $k = k_p k_o$ ) разомкнутой САУ.*

Точность статической системы принято оценивать *коэффициентом статизма*

$$s = \frac{\Delta x_{зам}}{\Delta x_{раз}}, \quad (86)$$

где  $\Delta x_{раз}$  - установившееся отклонение управляемой величины  $x$ , вызванное изменением, например, задающего воздействия  $x_z$ , в разомкнутой системе;

$\Delta x_{зам}$  - установившееся отклонение управляемой величины  $x$ , вызванное изменением задающего воздействия  $x_z$ , в замкнутой системе.

Точность системы – удовлетворительная, если коэффициент статизма системы  $s = 0,1 - 0,01$ , а передаточный коэффициент разомкнутой системы  $k = 10 - 100$ .

• Установившийся динамический режим наступает после окончания переходного процесса. В этом режиме управляемая величина и сигнал ошибки имеют только вынужденную составляющую, то есть изменяются только под действием внешних воздействий. В зависимости от *свойств САУ, от точки приложения и вида* внешнего воздействия ошибка может вести себя следующим образом:

- *ошибка равна нулю;*
- *ошибка равна постоянной величине;*
- *ошибка неограниченно возрастает.*

В свою очередь, свойства САУ характеризуются:

- *передаточным коэффициентом  $k$  разомкнутой САУ;*

- *порядком астатизма системы  $\nu$  - числом идеальных интегрирующих звеньев в разомкнутой АСУ ( $\nu = 0$  – статическая система;  $\nu \geq 1$  – астатическая система). Так как на практике находят применение И, ПИ, ПИД регуляторы, то порядок астатизма  $\nu = 1$ , но может быть и  $\nu = 2$ . В установившемся динамическом режиме, как и в статическом, действует правило: *точность воспроизведения системой управления задающего воздействия и точность подавления ею внешних возмущений тем лучше, чем больше передаточный коэффициент регулятора.**

Точность САУ в переходном режиме оценивают при помощи *прямых и косвенных* показателей качества.

Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии.

Косвенные показатели качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

В настоящее время разработаны и получили широкое распространение мощные средства компьютерного моделирования САУ, позволяющие точно и быстро вычислять переходный процесс, т.е. оценивать точность системы через *прямые показатели качества*. Различают: *колебательный, апериодический и монотонный* типовые переходные процессы. Каждый из трех типовых переходных процессов имеет свои преимущества и недостатки, и предпочтение той или иной форме процесса отдают с учетом особенностей объекта управления. Так, например, в электромеханических системах, коими являются электрические системы, нежелательны резкие знакопеременные усилия, и поэтому при выборе настроек САУ такими объектами стремятся к достижению апериодических и монотонных процессов.

К *основным прямым показателям качества управления САУ* (для одноконтурной системы) относят: *перерегулирование, степень затухания, длительность переходного процесса (время регулирования) и колебательность.*

Для показателей качества переходного процесса, вызванного ступенчатым изменением задающего воздействия  $x_3(t)$ :

- *Перерегулирование  $\sigma$*  - величина, равная отношению первого максимального отклонения  $x_m$  управляемой величины  $x(t)$  от ее установившегося значения  $x(\infty)$  к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \% \quad (87)$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30 - 40%.

- *Степень затухания* определяется по формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}. \quad (88)$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если  $\psi = 0,75 - 95$ .

- *Длительность переходного процесса (время регулирования)*  $t_n$  – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины  $x(t)$  от ее нового установившегося значения  $x(\infty)$  становятся меньше некоторого заданного числа  $\delta_n$ , т. е. до момента, после которого выполняется условие:

$$|x(t) - x(\infty)| \leq \delta_n. \quad (89)$$

В промышленной автоматике величину  $\delta_n$  обычно принимают равной 5% от установившегося значения  $x(\infty)$  [ $\delta_n = 0,05 x(\infty)$ ].

- *Колебательность*  $N$  – число переходов управляемой величины  $x(t)$  через ее установившееся значение  $x(\infty)$  за время переходного процесса  $t_n$ .

Для переходных процессов, вызванных возмущающим воздействием  $x_0(t)$  на выходе объекта управления вводятся следующие показатели качества:

- *Перерегулирование (колебательность)*  $\sigma$  – величина, равная отношению второго (отрицательного) максимального отклонения  $A_2$  к первому максимальному отклонению  $A_1$ :

$$\sigma = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100 = \frac{A_2}{x_m - x(\infty)} \cdot 100, \%. \quad (90)$$

- *Динамический коэффициент регулирования*  $R_d$  – величина, равная отношению первого максимального отклонения к отклонению управляемой величины объекта управления, вызванному тем же возмущением:

$$R_d = \frac{x_m}{k_o} \cdot 100, \%, \quad (91)$$

где  $k_o$  – передаточный коэффициент объекта управления. Коэффициент  $R_d$  показывает, насколько эффективно компенсирующее действие регулятора на объект управления (регулирования).

- *Длительность переходного процесса (время регулирования)*  $t_n$  – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины  $x(t)$  от ее нового установившегося значения  $x(\infty)$  становятся меньше некоторого заданного числа  $\delta_n$ . В промышленной автоматике величину  $\delta_n$  обычно принимают равной 5% от начального отклонения  $x(+0)$  [ $\delta_n = 0,05 x(+0)$ ].



Каждый из рассмотренных выше прямых показателей качества характеризует лишь *одно* какое-либо свойство САУ, лишь *один* признак переходного процесса. Причем, все показатели связаны с настроечными параметрами регулятора сложными зависимостями, имеющими, как правило, противоречивый характер: изменение параметра приводит к *улучшению* одних показателей качества и *ухудшению* других. Это обстоятельство существенно затрудняет выбор параметров регулятора. Поэтому в инженерной практике широко используются *интегральные показатели (оценки) качества*.

*Интегральная оценка качества* – определенный интеграл по времени (в пределах от 0 до  $+\infty$ ) от некоторой функции управляемой величины  $x(t)$ , а чаще сигнала ошибки  $\varepsilon(t)$ :

$$Q = \int_0^{\infty} f_0[x(t), t] dt. \quad (92)$$

Подынтегральная функция  $f_0$  выбирается таким образом, чтобы интеграл лучше характеризовал качество системы и проще выражался через коэффициенты передаточной функции замкнутой системы. Чтобы интеграл был сходящимся, в функцию  $f_0$  вводят не абсолютные значения  $x(t)$  или  $\varepsilon(t)$ , а их отклонения от конечных, установившихся значений.

Простейшей интегральной оценкой является *линейная интегральная оценка*:

$$Q_L = \int_0^{\infty} [x(\infty) - x(t)] dt, \quad (93)$$

которая равна площади, заключенной между прямой  $x(\infty)$  и кривой переходного процесса  $x(t)$ . Интегральная оценка учитывает как величину динамических отклонений, так и длительность их существования. Поэтому *чем меньше оценка, тем лучше качество процесса управления*.

Недостатком линейной интегральной оценки  $Q_L$  является то, что ее можно применять лишь для заведомо неколебательных, аperiodических переходных процессов. Интеграл, вычисленный для знакопеременной кривой будет существенно меньше интеграла, вычисленного для аperiodической кривой (хотя качество переходного процесса в этом случае лучше).

В связи с этим для колебательных переходных процессов применяют такие интегральные оценки, знакопеременность подынтегральной функции которых тем или иным способом устранена. Такой оценкой является, например, *модульная интегральная оценка*:

$$Q_M = \int_0^{\infty} |x(\infty) - x(t)| dt. \quad (94)$$

Все рассмотренные интегральные показатели используют не только для оценки качества, но и для *определения оптимальных значений настроечных параметров САУ*. Оптимальными считают такие значения, которые соответствуют минимуму интегрального показателя:  $Q \rightarrow \min$ .

Интегральные оценки качества являются комбинированными критериями, т.к. они оценивают в совокупности запас устойчивости, быстродействие и установившуюся ошибку. Основаны на разработанных условных интегральных показателях, достаточно просто характеризующих отклонение переходного процесса реальной системы от идеальной.

Все математические задачи, решаемые в теории автоматического управления, можно объединить в два больших класса: *задачи анализа* и *задачи синтеза*.

В *задачах анализа* полностью известна структура системы, заданы все (как правило) параметры системы, и требуется оценить какое-либо ее статическое или динамическое свойство. К задачам анализа относятся определение устойчивости и оценка качества управления системы.

*Задачи синтеза* можно рассматривать как обратные задачам анализа: в них требуется определить структуру и параметры системы по заданным показателям качества управления. Простейшими задачами синтеза являются, например, задачи определения передаточного коэффициента разомкнутой САУ по заданной ошибке или условию минимума интегральной оценки.

*Синтез САУ* – процедура определения структуры и параметров системы по заданным показателям качества управления. В общем случае при проектировании системы необходимо определить *алгоритмическую* и *функциональную* структуры системы, т. е. решить задачу полного синтеза.

Определение *алгоритмической* структуры (*теоретический синтез*) производится с помощью математических методов и на основании требований, записанных в четкой математической форме.

Определение *функциональной* структуры (*технический синтез*) заключается в выборе конкретных физических элементов и согласования их между собой по статическим и энергетическим характеристикам. Эта процедура не имеет пока строгой математической основы (т.е. не формализована) и поэтому относится к области инженерного творчества.

С учетом того, что *не любой элемент* алгоритмической структуры может иметь отображение в виде физического блока функциональной структуры, т.е. просто не может быть реализован, задачу синтеза в большинстве случаев невозможно решить, определяя сначала алгоритмическую структуру САУ, а затем по ней – функциональную структуру. Поэтому задачу синтеза в большинстве случаев решают следующим образом:

1). Сначала, исходя из известности объекта управления *ОУ*, требований к назначению и условиям работы САУ, по каталогам серийного оборудования выбирают функционально необходимые элементы системы: *регулирующий орган, исполнительное устройство ИУ, воспринимающее устройство*. Эти

элементы САУ вместе с объектом управления образуют *неизменяемую часть* функциональной структуры системы.

2). Затем, на основании требований к статическим и динамическим свойствам САУ определяют *изменяемую часть* функциональной структуры системы, в которую входят: *усилительно-преобразующий блок, корректирующие устройства*.

Таким образом, процедуры определения алгоритмической и функциональной структур тесно переплетаются друг с другом. Окончательное решение о структуре САУ принимается на основе компромисса между качеством управления, с одной стороны, и простотой и надежностью, с другой.

Заключительным этапом проектирования САУ является *параметрическая оптимизация* – определение настроечных параметров выбранного регулятора.

В настоящее время наибольшее развитие получили следующие вопросы синтеза:

- синтез оптимальных динамических характеристик системы;
- синтез параметров системы заданной структуры;
- синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества.

Синтез оптимальных динамических характеристик системы обычно сводится к решению вариационной задачи, обеспечивающей в соответствии с принятым критерием оптимизации наилучшее управление или теоретический минимум ошибки управления.

Синтез параметров системы заданной структуры и синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества можно рассматривать как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению САУ, при котором обеспечивается выполнение технических требований, предъявляемых к ней. При инженерном синтезе САУ стремятся обеспечить в первую очередь, требуемую точность и приемлемый характер переходных процессов. В этом случае из многих возможных решений окончательно выбирается одно, лучшее с точки зрения существующих конкретных условий и требований.

При синтезе параметров системы заданной структуры в системе регулирования и управления обычно задается объект управления. Если заданы структура регулятора и корректирующих устройств, то задача синтеза сужается до выбора параметров регулятора и корректирующих устройств, исходя из поставленных требований. Для выбора параметров САУ широко используются косвенные связи, установленные между характеристиками распределения корней (степень устойчивости, затухание, колебательность и т.п.) и переходными характеристиками САУ, а также непосредственные связи, существующие между нулями и полюсами и переходными характеристиками. Наиболее распространенными методами выбора параметров систем заданной структуры являются: использование характеристик распределения корней; метод стандартных коэффициентов.

В случае синтеза корректирующих устройств, считается, что основная

часть системы уже задана, что обычно и имеет место. Требуется синтезировать корректирующие звенья, то есть выбрать их схему и параметры. При этом необходимо, чтобы в результате коррекции САУ обеспечивались: требуемый запас устойчивости, точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

После решения задачи синтеза обычно выполняют анализ синтезированной системы, т. е. проверяют, обладает ли система необходимыми показателями устойчивости и качества управления.

Для решения задачи синтеза, например, алгоритмической структуры типовой одноконтурной САУ (рисунок) должны быть известны: *передаточная функция объекта управления  $W_O(p)$ , возмущение, действующее на выходе объекта,  $X_B(p)$* . Результатом решения задачи синтеза алгоритмической структуры должна быть передаточная функция регулятора  $W_P(p)$ , которые имеют *настроечные параметры*. Настроечные параметры регуляторов влияют следующим образом на показатели качества регулирования:

- Увеличение коэффициента  $k_{П}$  пропорциональной части регулятора приводит к увеличению перерегулирования  $\sigma$ , времени  $t_n$  переходного процесса и уменьшению степени затухания  $\Psi$ .

- Увеличение коэффициента  $k_{И}$  интегральной части регулятора приводит к уменьшению времени  $t_n$  переходного процесса и увеличению перерегулирования  $\sigma$ .

- Увеличение коэффициента  $k_{Д}$  дифференциальной части регулятора приводит к уменьшению времени  $t_n$  переходного процесса и увеличению перерегулирования  $\sigma$ .

9. Нелинейными называются системы автоматического управления, динамика движения которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Если хотя бы одно звено САУ имеет нелинейную статическую характеристику, то вся САУ является нелинейной. Большинство нелинейных САУ можно представить в виде последовательного соединения двух частей системы: линейной и нелинейной как показано на рисунке 13.  $W_{л}(s)$  - передаточная функция линейных элементов системы;  $W_{нл}(s)$  – передаточная функция нелинейных элементов системы;  $W_f(s)$  – передаточная функция линейного объекта управления по возмущению.

Существенные нелинейности обычно являются: разрывными или неоднозначными функциями или функциями, имеющими изломы. Преобразование любого входного воздействия для такой характеристики всегда нелинейно. Существенные нелинейности весьма разнообразны. Основные виды таких нелинейностей приведены в таблице 4.

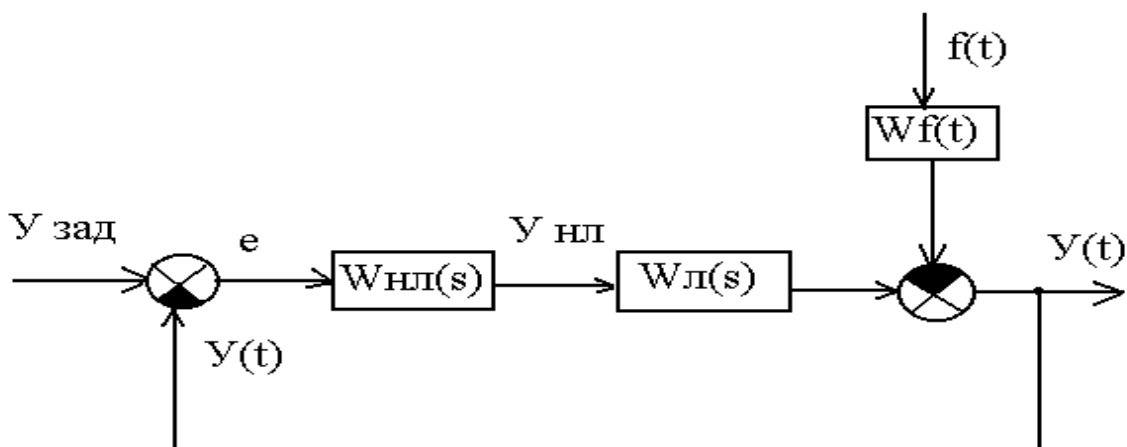
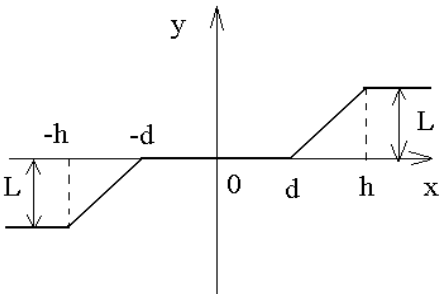
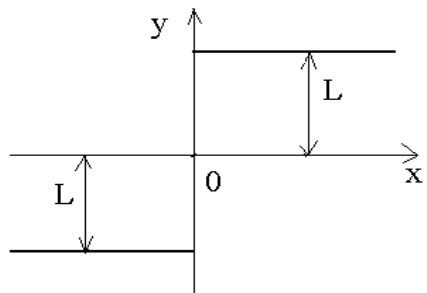
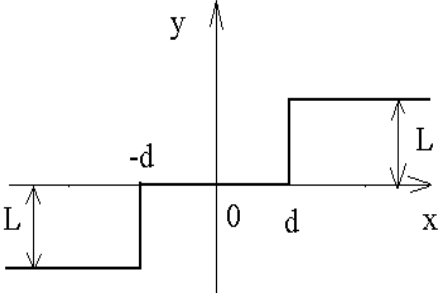
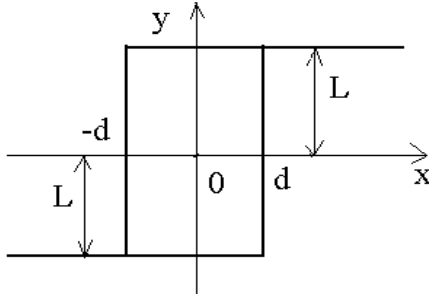


Рисунок 13 – Структурная схема нелинейной САУ

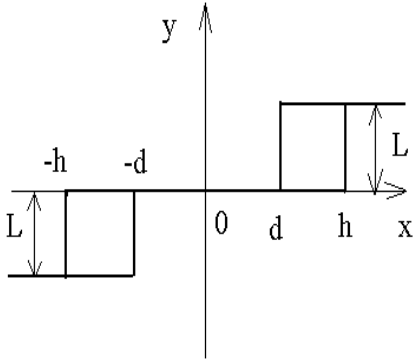
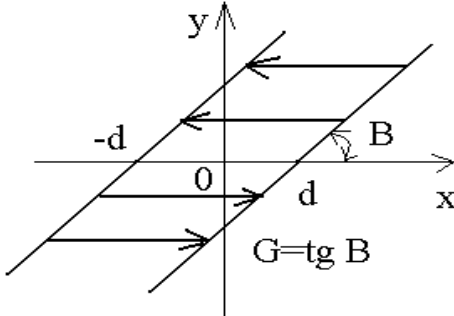
Таблица 4 – Основные виды нелинейностей второй группы

Название нелинейности	Вид статической характеристики	$y = f(t)$	Примеры реальных устройств
1	2	3	4
Зона насыщения		$y = \frac{L}{d}x,  x  \leq d$ $y = L, x > d$ $y = -L, x < -d$	Электрические усилители
Зона нечувствительности		$y = G(x + d), x < -d$ $y = 0,  x  \leq d$ $y = G(x - d), x > d$	Механические усилители

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
<p>Зона нечувствительности и зона насыщения</p>		$y = -L, x < -h$ $y = \frac{L}{h-d}(x+d),$ $h < x < -d$ $y = 0,  x  \leq d$ $y = \frac{L}{h-d}(x-d),$ $d < x < h$ $y = L, x > h$	<p>Гидравлические и пневматические усилители</p>
<p>Идеальное двухпозиционное реле</p>		$y = L, x > 0$ $y = -L, x < 0$	<p>Идеализированная характеристика двухпозиционных электрических приборов</p>
<p>Идеальное реле с зоной нечувствительности</p>		$y = -L, x < -d$ $y = 0,  x  \leq d$ $y = L, x > d$	<p>Идеализированная характеристика трехпозиционных электромагнитных приборов</p>
<p>Двухпозиционное реле</p>		$y = L, x > d$ $y = -L, x < d$ <p>при <math>x \neq 0</math></p> $y = L, x > -d$ $y = -L, x < -d$ <p>при <math>x \neq 0</math></p>	<p>Реле. Реальные двухпозиционные переключающие элементы</p>

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Трехпозиционное реле		$y = L, x > h$ $y = 0, -d < x < h$ $y = -L, x < -d$ <p>при <math>x/t &gt; 0</math></p> $y = L, x > d$ $y = 0, -h < x < d$ $y = -L, x < -h$ <p>при <math>x/t &lt; 0</math></p>	<p>Реальные трехпозиционные переключающие элементы</p>
Люфт, зазор или сухое трение		$y = G(x - d), x/t > 0$ $y = G(x - d), x/t < 0$	<p>Различные механические передачи с люфтами, зазорами и сухим трением</p>

Указанные в таблице примеры звеньев ни в коей мере не претендуют на полноту. Такие нелинейные характеристики могут иметь элементы и другой физической природы. Нелинейные САУ характеризуются более сложными и разнообразными динамическими процессами по сравнению с линейными САУ. Характер движения нелинейных САУ зависит от начальных условий. В нелинейных САУ возможен без каких-либо внешних возмущений новый по сравнению с линейными САУ вид установившегося движения – автоколебания, то есть устойчивые колебания с определенной амплитудой и частотой, зависящих от конструктивных особенностей САУ. Если на вход нелинейной САУ подать периодическое возмущение, то в ней могут наблюдаться особые случаи резонанса, который может происходить на частоте, равной доле частоты входного воздействия. Возможен и ряд других особенностей движения нелинейных САУ.

Вопрос об устойчивости нелинейных САУ нельзя решить так же просто как в линейных САУ. Нелинейная САУ может быть *устойчива в малом* (при незначительных начальных возмущениях) и *неустойчива в большом* (если начальные условия превышают некоторые определенные граничные значения). Нелинейная САУ может иметь область устойчивости равновесного состояния с

постоянным значением регулируемой величины и быть асимптотически устойчивой. Она может иметь одну или несколько областей устойчивых автоколебаний. Нелинейная САУ неустойчива в малом и имеет устойчивые автоколебания в большом. Нелинейные САУ могут иметь области неустойчивости.

Поведение нелинейных САУ описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Общих методов решения этих уравнений нет, и для анализа работы нелинейных САУ при разработке и проектировании используют некоторые частные способы решения нелинейных уравнений: метод фазового портрета, метод гармонической линеаризации, метод припасовывания, статистической линеаризации и т.д.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называется устойчивостью?
2. Какие методы определения устойчивости Вы знаете? В чем они заключаются?
3. Нарисуйте графики движения устойчивой САУ, неустойчивой САУ и САУ, находящейся на границе устойчивости.
4. Как определяется устойчивость САУ по расположению корней характеристического уравнения?
5. Какое условие называется необходимым? В каком случае это условие становится необходимым и достаточным условием устойчивости?
6. Какие критерии устойчивости называются алгебраическими, а какие частотными?
7. Сформулируйте условие устойчивости по критерию Рауса.
8. Сформулируйте условие устойчивости по критерию Гурвица.
9. Сформулируйте условие устойчивости по критерию Михайлова.
10. Сформулируйте условие устойчивости по критерию Найквиста для первого и второго случаев.
12. Сформулируйте общее условие устойчивости по критерию Найквиста.
13. Как определяется устойчивость САУ по логарифмическим частотным характеристикам?
14. Какая область называется областью устойчивости, какая областью неустойчивости? Каким образом можно построить область устойчивости?
15. От чего зависит вид области устойчивости и ее границы?
16. Что определяет запас устойчивости?
17. Как определяется устойчивость САУ со звеном чистого запаздывания?
18. Что называют качеством работы САУ? Показателями качества работы САУ?
19. В каких режимах принято оценивать точность САУ по ошибкам? Почему?
20. Как оценивается качество управления САУ в различных режимах работы?
21. В чем заключаются задачи синтеза САУ?
22. Какие системы автоматического управления называются нелинейными?
23. Какие Вы знаете виды нелинейностей?



24. От чего зависит характер движения нелинейных САУ?

25. Какие способы решения нелинейных дифференциальных уравнений используют при разработке и проектировании? Перечислите их.

#### 4 Виды и типы схем автоматизации

##### **План:**

1. Схемы, применяемые при автоматизации технологических процессов.
2. Нормативные документы необходимые для разработки, выполнения и чтения схем.

1. В проектах автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве распространены следующие виды схем: структурные, функциональные, принципиальные. В зависимости от видов элементов и связей, применяемых в схемах, принципиальные схемы подразделяются на: электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные. Эту классификацию, а также определения разных схем устанавливает ГОСТ 2.701-76 «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению».

##### **1) Структурные схемы.**

Определяют основные функциональные части системы управления, их назначение и взаимосвязь. В том числе определяют системы контроля и управления технологическими процессами данного объекта управления и устанавливают взаимные связи между щитами автоматизации и пунктами управления (агрегатными, групповыми, центральными и т.п.), оперативными рабочими постами основных групп технологического оборудования, показывают техническую сущность автоматического управления объектом.

На структурных схемах в виде прямоугольников и окружностей изображают основные подразделения автоматизируемого объекта (цехи, участки, агрегаты и т.д.) с указанием их наименования, местные щиты и пульты управления и контроля, центральные диспетчерские пункты управления и контроля основные узлы системы управления (датчики, исполнительные устройства, подсистемы контроля и сигнализации и т.п.), вычислительные связи и линии связи между отдельными элементами системы управления с указанием (стрелкой) направления передачи информации или воздействий. Иногда линии связи помечаются буквами, обозначающими вид связи, например, К - контроль, С – сигнализация и т.п. (пример структурной схемы приведен на рисунке 14).

Структурные схемы разрабатываются на стадии «Технический проект» при двухстадийном проектировании и являются принципиальной основой для проектирования систем и схем автоматизации. Для простых объектов структурные схемы допускается не разрабатывать, но в данном случае в пояснительной записке необходимо давать пояснения.

##### **2) Функциональные схемы.**

Являются техническим документом, разъясняющим определенные процессы, протекающие в системе. Они определяют структуру и уровень автоматизации технологического процесса (оснащение приборами и средствами автоматизации, оснащение средствами сбора, обработки и передачи информации и т.п.).

На функциональной схеме могут быть изображены автоматическая система в целом, управляющие устройства системы или отдельные функциональные блоки.

Функциональные схемы связаны непосредственно с технологией производства и технологическим оборудованием и, как правило, показываются на схеме размещения технологического оборудования (технологической схеме).

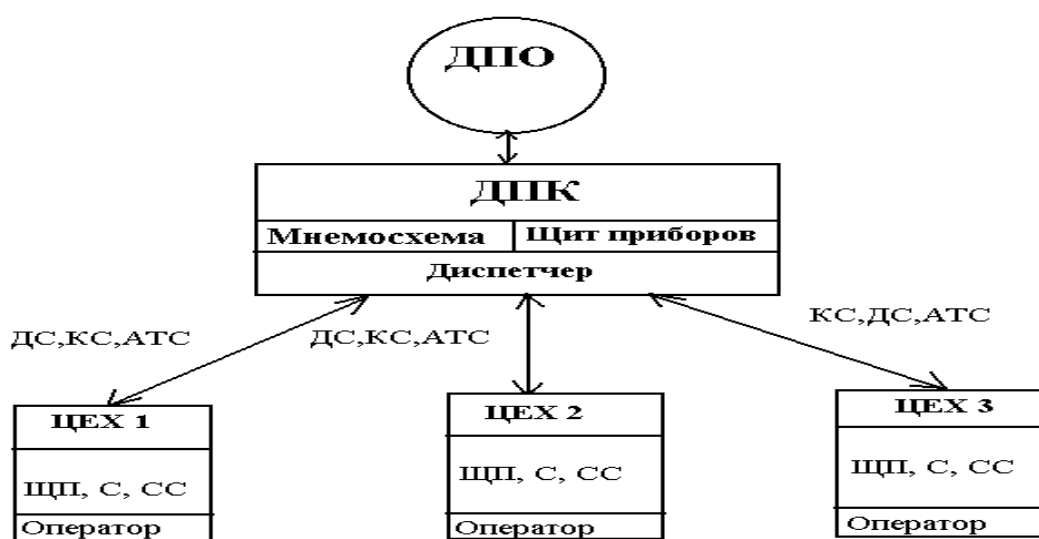


Рисунок 14 – Структурная схема управления: ДПО – диспетчерский пункт объединения; ДПК – диспетчерский пункт комплекса; ЩП – щит приборов; С – сигнализация; СС – средства связи; ДС – диспетчерская связь; КС – контроль и сигнализация; АТС – автоматическая телефонная связь

Технологическое оборудование должно соответствовать своей действительной конфигурации, но изображаться упрощенно (без соблюдения масштаба, без второстепенных конструктивных деталей и других подробностей). Кроме технологического оборудования на функциональных схемах изображают технологические трубопроводы (воды, пара, аммиака и т.п.). Изображение технологического оборудования и трубопроводов должно показывать их взаимное расположение, взаимосвязи между ними и взаимодействие с приборами и средствами автоматизации. Трубопроводы могут изображаться одной линией или двумя линиями. При однолинейном изображении трубопроводов вид передаваемой среды изображают цифрами. При наличии в трубопроводах нескольких сред одного наименования к числовому обозначению часто добавляют букву, например, пар обозначают

цифрой 2, пар насыщенный – 2н, а пар перегретый – 2п и т.п. При изображении трубопровода в две линии промежутки между линиями закрашивают в цвета, например, воде соответствует зеленый цвет, но такое изображение трубопроводов более распространено на мнемосхемах. Условные обозначения трубопроводов на схемах и цвет на мнемосхемах даны в таблице 5.

До 1979 года приборы и средства автоматизации на функциональных схемах изображали по ГОСТ 3925-59. В настоящее время вошел в силу ОСТ 36-27-77 «Приборы и средства автоматизации». Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов». Система условных обозначений в данном стандарте, основана на рекомендациях СЭВ и аналогична системе условных обозначений, применяемых во многих странах мира.

Таблица 5 – Условные изображения для жидкостей и газов

Содержимое трубопроводов	Условное обозначение на схемах	Цвет на мнемосхемах
1	2	3
Жидкость или газ, преобладающие в данном проекте	_____	Красный, черный
Вода	___1___1___	Зеленый
Пар	___2___2___	Розовый
Воздух	___3___3___	Голубой
Азот	___4___4___	Темно-желтый
Кислород	___5___5___	Синий
Аммиак	___11___11___	Серый
Кислота (окислитель)	___12___12___	Оливковый
Щелочь	___13___13___	Серо-коричневый
Масло	___14___14___	Коричневый
Жидкое горючее	___15___15___	Желтый
Противопожарный трубопровод	___26___26___	Красный
Трубопровод под разряжением	___27___27___	Светло-серый

Согласно данному ОСТу применяют три группы обозначений: окружностью (овалом) обозначаются измерительные преобразователи (датчики) и приборы, в том числе измерительные, регулирующие, контролирующие и сигнализирующие; квадратом – исполнительные механизмы; в виде двух треугольников, сложенных вершинами, - регулирующие органы.

По виду измеряемой величины и функциональному назначению приборы различают при помощи системы буквенных обозначений, вписываемых внутри условного обозначения прибора. Для этого используют прописные буквы латинского алфавита (таблица 6), причем эти буквы применяют как для обозначения измеряемой величины, так и для обозначения функционального признака прибора. Значение буквы зависит от места его расположения в буквенном обозначении прибора. Буквенное обозначение прибора строится в соответствии со схемой показанной на рисунке 15.



Рисунок 15 – Принцип построения условного буквенного обозначения на функциональных схемах

Первая буква во всех обозначениях означает измеряемую величину. Иногда и вторая буква относится к измеряемой величине как уточняющая или дополняющая характер измерения.

Следующие буквы означают функциональный признак прибор. Причем устанавливается такая последовательность расположения этих букв JRCSA (показание - регистрация - регулирование или управление - включение, отключение, переключение - сигнализация). Допускается указывать только те функциональные признаки, которые используют в данной схеме автоматики.

Кроме указанных в таблице 6 буквенных условных обозначений, применяют дополнительные буквенные обозначения E, T, K, Y. При этом букву E используют для обозначения первичного преобразователя (чувствительного элемента), букву T - для обозначения промежуточного преобразования, дистанционной передачи, букву K - для обозначения приборов, имеющих

станцию управления, а букву У - при построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

Порядок построения условного обозначения с применением дополнительных букв следующий: на первом месте ставят букву, означающую измеряемую величину; на втором - дополнительные буквы Е, Т, К, У.

Таблица 6 – Буквенные обозначения на функциональных схемах автоматизации

Обозначение	Измеряемая величина		Функция, выполняемая прибором		
	основное обозначение первой буквы	дополнительное значение, уточняющее значение первой буквы	отображение информации	формирование выходного сигнала	дополнительное значение
1	2	3	4	5	6
<b>А</b>	-	-	Сигнализация <sub>1</sub>	-	-
<b>В</b>	-	-	-	-	-
<b>С</b>	-	-	-	Регулирование, управление	-
<b>Д</b>	Плотность	Разность, перепад <sup>6</sup>	-	-	-
<b>Е</b>	Любая электрическая величина	-	-	-	-
<b>Ф</b>	Расход	Соотношение, доля <sup>6</sup> , дробь	-	-	-
<b>Г</b>	Размер, положение, перемещение	-	-	-	-
<b>Н</b>	Ручное воздействие	-	-	-	Верхний предел измеряемой величины
<b>І</b>	-	-	Показание	-	-
<b>Ж</b>	-	Автоматическое переключение, обегание	-	-	-
<b>К</b>	Время, временная программа	-	-	-	-
<b>Л</b>	Уровень	-	-	-	Нижний предел
<b>М</b>	Влажность	-	-	-	-
<b>Н</b>	-	-	-	-	-
<b>О</b>	-	-	-	-	-
<b>Р</b>	Давление, вакуум	-	-	-	-

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6
<b>Q</b>	Величина, характеризующая качество, состав, концентрацию и т.п.	Интегрирование, суммирование по времени <sup>6</sup>	-	-	-
<b>R</b>	Радиоактивность <sup>3</sup>	-	Регистрация	-	-
<b>S</b>	Скорость, частота	-	-	Включение, отключение, переключение <sup>1</sup>	-
<b>T</b>	Температура	-	Дистанционная передача информации	-	-
<b>U</b>	Несколько разнородных измеряемых величин <sup>4</sup>	-	-	-	-
<b>V</b>	Вязкость	-	-	-	-
<b>W</b>	Масса	-	-	-	-
<b>X</b>	Нерекомендуемая резервная буква <sup>5</sup>	-	-	-	-
<b>Y</b>	-	-	-	-	-
<b>Z</b>	-	-	-	-	-

**Примечания:** 1. Букву А применяют для обозначения функции «Сигнализация» независимо от того, вынесена ли сигнальная аппаратура на какой-либо щит или для сигнализации используют лампы, встроенные в сам прибор.

Сигнализируемые предельные значения измеряемых величин следует конкретизировать добавлением букв Н и L. Эти буквы наносят вне графического обозначения справа от него.

Букву S используют для обозначения контактного устройства прибора, применяемого только для включения, отключения, блокировки и т.д.

При использовании контактного устройства прибора для включения и одновременно для сигнализации следует применять обе буквы: S и A.

Буквой S не следует обозначать функцию регулирования (в том числе позиционного).

2. Для конкретизации измеряемой величины около изображения прибора необходимо указывать наименование или символ измеряемой величины.

3. Если необходимо, то около изображения прибора допускается указывать вид радиоактивности.

4. Букву U можно использовать для обозначения прибора, измеряющего несколько разнородных величин. Подробная расшифровка должна быть приведена около прибора или на поле чертежа.

5. Для обозначения величины, не предусмотренной данным стандартом, можно использовать резервные буквы. При этом многократно применяемые величины следует обозначать одной и той же буквой. Для одноразового или редкого применения можно использовать букву X. Буквенные резервные обозначения должны быть расшифрованы на чертеже. Не допускается в одной и той же документации использовать одну и ту же резервную букву для обозначения разных величин.

6. Для обозначения дополнительных значений D, F, Q допускается применять строчные буквы d, f, q.

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств, применяют дополнительные буквенные обозначения, расшифровывающие вид преобразования или операции, выполняемой вычислительным устройством. Род энергии сигнала обозначается буквами: Е - электрический, Р - пневматический, G - гидравлический. Виды форм сигнала: А - аналоговый, D - дискретный. Для обозначения операций, выполняемых вычислительными устройствами, применяют математические знаки суммирования, извлечения корня, умножения, деления и т.п. Эти буквы или символы наносятся вне пределов графического обозначения прибора, справа от него.

### **3) Принципиальные схемы.**

Являются проектным документом, определяющим полный состав электрических элементов и связей между ними, а также дающими детальное представление о принципах работы схемы. Они служат основанием для разработки других чертежей и документов, для составления заказных спецификаций, а также используются при наладке и эксплуатации автоматических систем. Эти схемы разрабатывают в соответствии с техническим заданием и на основании принятых и запроектированных в функциональных схемах решений.

Принципиальные схемы должны содержать элементарные схемы контроля, управления, регулирования, блокировок, защит и сигнализации с таблицами пояснений; диаграммы замыкания контактов ключей, приборов и аппаратов; контакты, занятые в других схемах; перечень аппаратуры; общие замечания к схемам. Схемы силовых цепей можно не показывать, но необходимо делать ссылки на чертежи, на которых они показаны. Текстовый материал приводится кратко, четко сформулировано во избежание двоякого толкования. Для сложных схем допускается приводить краткие пояснения работы схемы или узла, изображенные на схеме.

Лист заполняется следующим образом: в левой части - основная схема, затем графический материал, поясняющий действие схемы, а в правой части - текстовый материал.

При выполнении принципиальных схем рекомендуется пользоваться строчным методом. Условные графические обозначения элементов или их составных частей, входящих в одну цепь изображают последовательно один за другим по прямой, а отдельные цепи - рядом, образуя параллельные (горизонтальные или вертикальные) строки. Условные графические изображения выполняются по ГОСТу.

Все аппараты (реле, контакты и т.п.) на электрических схемах изображают в отключенном положении. Аппараты, не имеющие отключенного положения (путевые и конечные выключатели и т.п.), показывают в одном из положений, принимаемом за исходное положение.

Для обозначения положения контактов многопозиционных аппаратов и устройств ключей и переключателей управления, программных реле и др. часто

используют специальные диаграммы, показывающие состояние контактов при различных положениях подвижной части аппаратов.

Все аппараты и элементы при разработке схемы должны получать схемное или позиционное обозначение, причем это обозначение сохраняется для всех элементов аппарата. Система маркировки должна также различать однотипную аппаратуру.

Для облегчения понимания принципиальной схемы их разбивают на функциональные участки и сбоку делают надписи, поясняющие функциональное назначение цепи или указывающее, к какой системе управления технологическим оборудованием принадлежит цепь.

К **гидравлическим** и **пневматическим** принципиальным схемам относят схемы, выполненные на элементах гидро- и пневмоавтоматики. В этом случае на схемах изображают все гидравлические или пневматические элементы или устройства, входящие в систему или изделие.

2. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – это человеко-машинная система, предназначенная для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятыми критериями управления. Обобщенная блок-схема функционирования АСУ ТП показана на рисунке 16. А критерий управления характеризует качество работы технологического объекта управления (ОУ).

Процесс создания АСУ ТП заключается в алгоритмизации объекта управления (составлении свода правил взаимодействия управляющих устройств и ОУ), реализации полученного алгоритма при помощи комплекса технических средств и организации функционирования АСУ ТП в конкретных условиях данного объекта.

Разработка и внедрение АСУ ТП должны осуществляться в несколько этапов: подготовка технического задания, предпроектные работы, монтаж и наладка, ввод в действие АСУ ТП.

Техническое задание на создание АСУ ТП разрабатывает заказчик, как правило, с участием проектной организации - разработчика АСУ ТП. В техническое задание включают сведения о предприятии, основные данные об объекте управления, условия функционирования автоматизированной системы. Кроме того, указывается цель создания АСУ ТП и ее роль в общей структуре управления производством, излагается перечень основных функций системы, приводятся ориентировочные затраты на создание АСУ ТП и предполагаемые технико-экономические показатели автоматизируемого производства, намечаются ориентировочные сроки выполнения работ. К техническому заданию прилагаются исходные данные и другие сведения, необходимые разработчику.

Предпроектные работы обычно состоят из подготовительных работ, теоретических и экспериментальных исследований ОУ и разработки технических предложений по проектированию АСУ ТП. При подготовительных работах обследуется ОУ, предварительно определяются функции АСУ ТП и выбираются технические средства, осуществляется



технико-экономическое обоснование, разрабатывается план-график создания и ввода в эксплуатацию АСУ ТП, разрабатывается задание на проведение исследовательских работ. При разработке необходимо правильно определить степень автоматизации. Современные средства автоматики не могут полностью заменить человека при управлении многими технологическими процессами, поэтому, в системах управления необходимо разумное сочетание человека и автоматики. Сложность АСУ ТП должна быть экономически обоснована. На данном этапе необходимо проанализировать информационные потоки для оценки структуры и интенсивности потоков информации, циркулирующей в системе, на основании этого можно представить структуру системы и ее пропускную способность, необходимую для своевременной и качественной обработки поступающей информации.

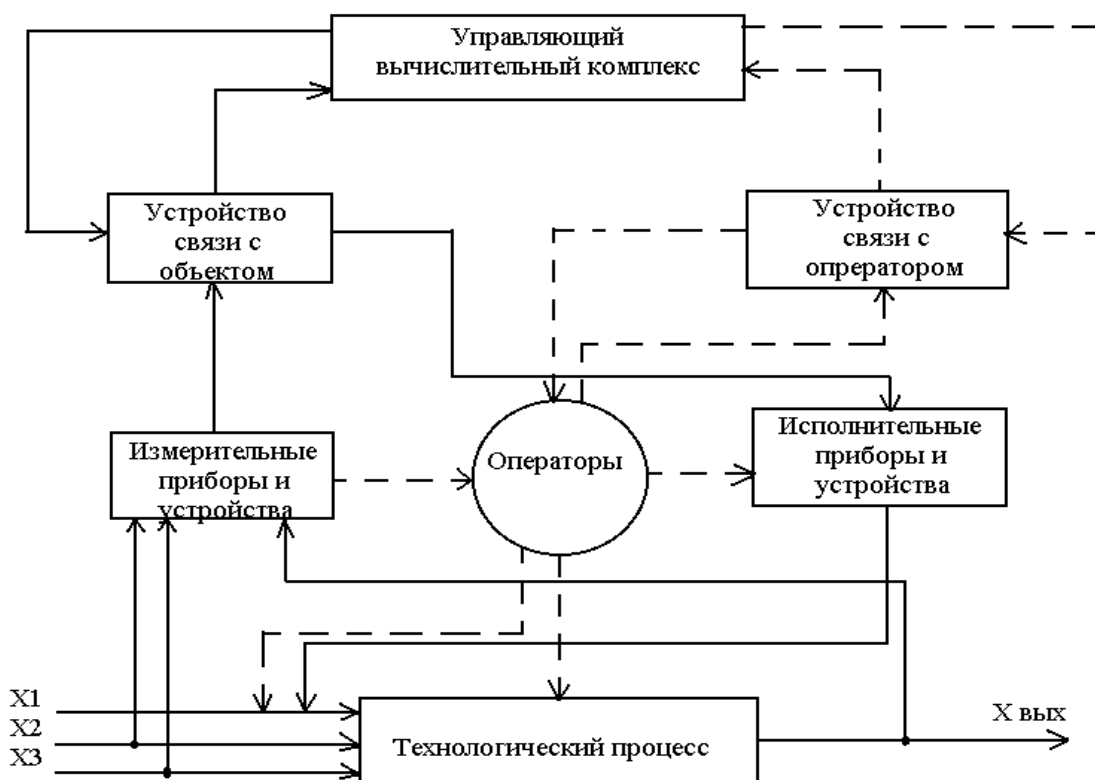


Рисунок 16 - Обобщенная блок-схема функционирования АСУ ТП: X1 - входные управляющие воздействия; X2 - входные контролируемые, но неуправляемые воздействия; X3 - входные неконтролируемые воздействия; X<sub>вых</sub> - выходные переменные технологического процесса

В ходе теоретического и экспериментального исследований ОУ определяются характеристики машин, аппаратов и установок, осуществляющих автоматизируемый технологический процесс. По

результатам исследований составляют технологическую схему процесса с изображением агрегатов и указанием параметров, в отношении которых реализуются те или иные функции АСУ ТП, на схеме отображаются все материальные и энергетические потоки и величины, характеризующие потоки. Кроме того, дается описание преобразований веществ и энергий в технологическом процессе; составляется математическая модель для каждого из агрегатов, устройств и аппаратов; составляется таблица, в которой указывается наименование величины, ее размерность, диапазон измерения (для переменных), значение постоянных величин и точность их определения, способы определения неизвестных функций, входящих в системы уравнений, если эти функции возможно и необходимо определять в ходе функционирования АСУ ТП.

До начала разработки технического проекта проводится моделирование автоматизируемого технологического процесса. При этом необходимо имитировать различные ситуации: нормальные и аварийные, которые могут возникнуть в реальных условиях, и должно предусматриваться возможность автоматического и ручного управления.

В состав проекта включаются: спецификация, пояснительная записка, уточнение алгоритма по каждой функции, уточненные структурные схемы управления и контроля, структурная схема комплекса технических средств АСУ ТП, схемы автоматизации технологического процесса. Схемы потоков информации, принципиальные схемы, схемы щитов и пультов, схемы подключения, кабельный журнал, заказные спецификации, обоснование экономической эффективности, сметы затрат на создание и ввод в действие системы, документация программного обеспечения.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Для чего служат структурные схемы? Что изображается на них?
2. Для чего служат функциональные схемы? Что изображается на них?
3. Каким образом на функциональных схемах изображают средства автоматики?
4. Для чего служат принципиальные схемы? Что изображается на них?
5. Как заполняется лист с принципиальными схемами?

#### 5 Технические средства автоматизации. Общие сведения.

##### **План:**

1. Основные понятия и определения. Классификация элементов и систем автоматики.
2. Характеристики и типы элементов. Параметры элементов автоматики.
3. Схемы измерения.

1. Любые простые и сложные средства автоматики состоят из отдельных связанных между собой элементов. *Элемент автоматики* - часть устройства автоматической системы, которая выполняет самостоятельные функции в

качественных или количественных преобразованиях физических величин. Поскольку отдельные элементы отдельного устройства взаимосвязаны между собой, то второй задачей элементов автоматики является передача преобразованного воздействия от предыдущего звена к последующему. Принцип построения элементов автоматики основан на различных физических явлениях. Эти элементы отличаются между собой схемами и конструкциями, входными и выходными величинами, назначением и выполняемыми функциями.

Все средства автоматизации по функциональному признаку разделены на следующие группы:

- получения информации о состоянии процесса (измерительные преобразователи и другие устройства, используемые для контроля состояния процесса);

- приема, преобразования и передачи информации по каналам связи (устройства телемеханики);

- преобразования хранения и обработки информации, формирования команд управления, связи с оперативным персоналом (устройства для формирования сигналов управления и командной информации, функциональные преобразователи, логические устройства, реле программные устройства, регуляторы, задатчики, вычислительные устройства);

- использования командной информации для воздействия на управляемый объект (исполнительные устройства, устройства представления информации)

2. Все элементы можно сравнивать и оценивать общими характеристиками статической и динамической (тема 2), а также передаточными коэффициентами (коэффициентами чувствительности, усиления, стабилизации, преобразования), погрешностью, надежностью, стабильностью и т.д. Различают элементы *реверсивные* и *нереверсивные*. У реверсивного элемента при изменении знака входной величины меняется знак выходной величины. Элементы, имеющие линейные характеристики называются *линейными* (встречаются очень редко). Большинство реальных элементов имеют нелинейные характеристики и называются *нелинейными* (некоторые виды нелинейностей приведены в теме 3). Методы линеаризации нелинейных характеристик рассмотрены в теме 2. Классификация систем автоматики рассмотрена в теме 1.

Для сравнения элементов между собой по динамическим свойствам используется *постоянная времени T*.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Что называется элементом автоматики?
2. Как разделяются средства автоматики по функциональному признаку?
3. С помощью, каких характеристик и параметров можно сравнивать средства автоматики?
4. Какие элементы называют реверсивными, а какие не реверсивными?

6 Воспринимающие элементы и датчики.

## План:

1. Классификация измерительных преобразователей (ИП).
2. Средства измерения величин.

1. По назначению ИП делятся на преобразователи механических, тепловых, химических, магнитных, биологических и других физических величин. По принципу действия ИП делятся на генераторные и параметрические, соответствующая классификация приведена на рисунке 17. Рассмотрим принципы действия их.

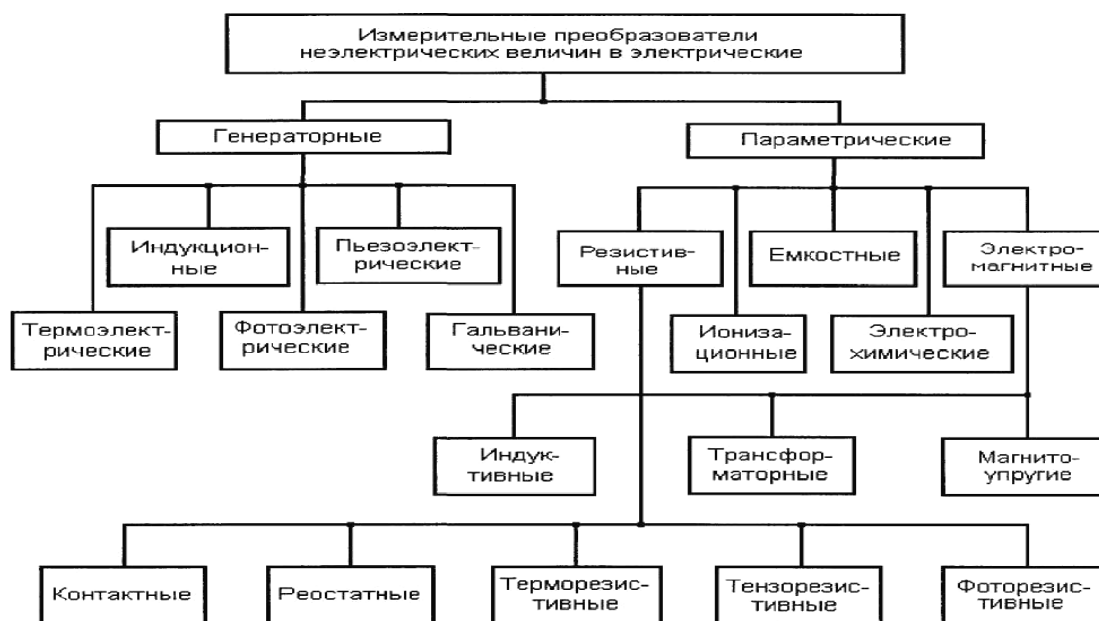


Рисунок 17 -Классификация измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрические

*Генераторные преобразователи.* Принцип действия генераторного преобразователя основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму энергии. Принципы их технической реализации иллюстрируют схемы, приведенные на рисунке 18. Преобразователь, реализующий *термоэлектрический эффект* (термопара), содержит два проводника М1 и М2 различной химической природы (рисунок 18а). Если температуру одного места соединения (спая) проводников сделать отличной от температуры другого, то в цепи появится термоЭДС, являющаяся разностью функций температур спаев. ТермоЭДС  $E$  будет пропорциональна измеряемой температуре при постоянной температуре (соответствующий нерабочий спай термопары помещен в среду с постоянной температурой, равной, например,  $0^{\circ}\text{C}$ ).

В преобразователе с *пироэлектрическим эффектом* определенные кристаллы, называемые пироэлектриками (например, триглицин сульфата), испытывают спонтанную электрическую поляризацию, зависящую от их температуры. В этом случае на двух противоположных поверхностях преобразователя появляются электрические заряды противоположных знаков, пропорциональные этой поляризации (рисунок 18б).

Поглощенный кристаллом поток излучения приводит к росту его температуры и соответствующему изменению поляризации, которое определяется по изменению напряжения на зажимах конденсатора. В преобразователе с *пьезоэлектрическим эффектом* изменение механического напряжения в кристалле пьезоэлектрика, например, кварца, приводит к деформации, вызывающей появление на противоположных гранях кристалла одинаковых по величине электрических зарядов противоположного знака (рисунок 18в). Таким образом, измерение силы или приводимых к ней величин (давление, ускорение) осуществляется измерением напряжения между зажимами пьезоэлектрика.

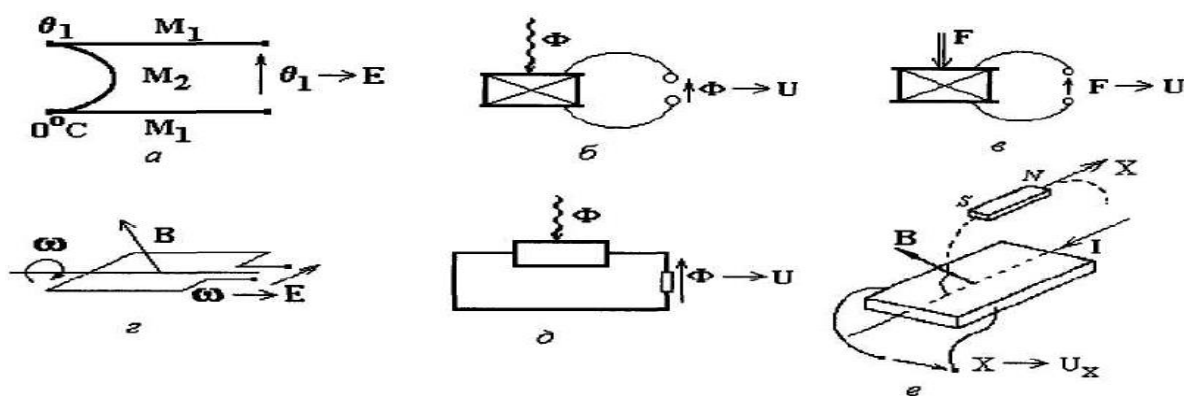


Рисунок 18 - Примеры использования физических явлений (эффектов) для построения генераторных преобразователей: а - термоэлектрический; б - пироэлектрический; в - пьезоэлектрический; г - электромагнитной индукции; д - фотоэлектрический; е – Холла

В преобразователе, использующем явление *электромагнитной индукции*, при перемещении проводника в постоянном магнитном поле возникает ЭДС, пропорциональная скорости его перемещения и значению магнитного потока (рисунок 18г). При воздействии переменного магнитного поля на неподвижный замкнутый контур в нем индуцируется ЭДС, равная по значению (и противоположная по знаку) скорости изменения магнитного потока. При перемещении источника магнитного поля (например, магнита) относительно неподвижного контура в нем также будет возбуждаться ЭДС. Таким образом, измерение ЭДС электромагнитной индукции позволяет определить скорость перемещения объекта, механически связанного с подвижным элементом электромагнитного преобразователя.

В преобразователях используется и фотоэлектрические эффекты, различные по своим проявлениям, но объединенные общей причиной их возникновения - освобождением электрических зарядов в веществе под действием светового излучения, длина волны которого меньше некоторого порогового значения, являющегося характеристикой чувствительного материала (рисунок 18д).

Преобразователь на основе фотоэлектромагнитного эффекта. Приложение магнитного поля, перпендикулярного падающему излучению, вызывает в освещенном полупроводнике появления электрического напряжения в направлении по нормали к полю и падающему излучению. Фотоэлектрические эффекты являются основой фотометрии и обеспечивают передачу информации, носителем которой является свет.

Преобразователь на основе эффекта Холла. При пропускании электрического тока через образец (пластину) полупроводника, находящийся в однородном магнитном поле (вектор магнитной индукции  $B$  составляет угол  $\theta$  с направлением тока  $I$ ), в направлении, перпендикулярном полю, возникает ЭДС  $U_x = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$ , где  $K_H$  зависит от типа проводимости и размеров пластины (рисунок 18е).

Преобразователь Холла используют для измерения перемещения объектов, а так же величин преобразуемых в перемещении, например давления. Постоянный магнит преобразователя механически связывают с объектом, и при смещении магнита пропорционально изменяется выходное напряжение преобразователя (при этом ток постоянен).

Рассмотрим подробно некоторые типы генераторных преобразователей применяемых на практике.

*Индукционные измерительные преобразователи.* Принцип действия таких преобразователей основан на законе электромагнитной индукции. Преобразователь имеет катушку. При воздействии входной величины на преобразователь, изменяется потокосцепление  $\psi$  катушки с внешним по отношению к катушке магнитным полем:

$$\psi = w \cdot \Phi = w \cdot B \cdot S \quad (95)$$

где  $w$  – число витков катушки;  $\Phi$  – проходящий через катушку магнитный поток;  $S$  - площадь поперечного сечения катушки;  $B$  – магнитная индукция.

При этом в катушке наводится ЭДС:

$$E = - \frac{d\psi}{dt}. \quad (96)$$

ЭДС в катушке может наводиться при изменении во времени любой из перечисленных величин  $w$ ,  $S$ ,  $B$ .

В качестве примера рассмотрим преобразователь, который представляет собой магнитную систему с постоянным магнитом, в воздушном зазоре которой перемещается катушка (рисунок 19).

При движении катушки в направлении  $X$  изменяется площадь сечения катушки, находящейся в магнитном поле,  $S = b \cdot X$ .

Это приводит к изменению потокосцепления  $\psi = w \cdot \Phi = w \cdot B \cdot b \cdot S$  и в катушке наводится ЭДС:

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -w \cdot B \cdot b \cdot \frac{dX}{dt}. \quad (97)$$

Индукционные преобразователи служат для преобразования линейной  $\frac{dX}{dt}$  или угловой  $\frac{d\alpha}{dt}$  скорости перемещения катушки относительно магнитного поля в ЭДС. Они преобразуют механическую энергию линейного или углового перемещения катушки в электрическую энергию.

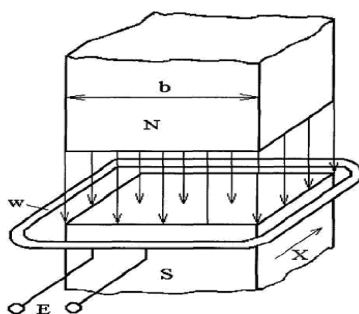


Рисунок 19 - Индукционный преобразователь

*Преобразователи скорости и вибрации.* Индукционные преобразователи генерируют ЭДС только при перемещении катушки в магнитном поле. По этой причине преобразователи этого типа могут служить для преобразования линейной скорости в ЭДС при небольших линейных перемещениях. Они обычно применяются для измерения скорости вибрации, когда ее амплитуда не превышает нескольких сантиметров.

Одно из конструктивных решений преобразователя скорости вибрации показано на рисунке 20а. Преобразователь имеет кольцевой магнит 1, расположенный внутри стального яра 2. Магнитный поток от постоянного магнита проходит по центральному цилиндрическому сердечнику через воздушный зазор и полюсной наконечник 3 с цилиндрической расточкой. В цилиндрическом воздушном зазоре находится намотанная на каркас измерительная катушка 4, которая может перемещаться в воздушном зазоре вдоль оси преобразователя.

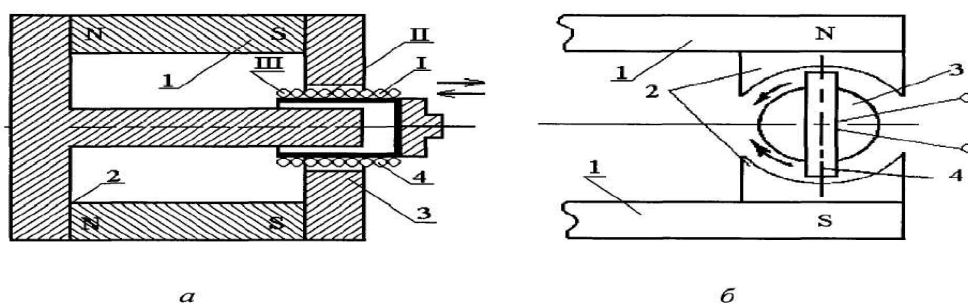


Рисунок 20 - Примеры индукционных преобразователей: а - преобразователь линейных вибраций; б - преобразователь угловых вибраций

Измерительную катушку 4 условно можно разделить на три части. Часть I находится вне магнитопровода и магнитный поток в нее не заходит, т.е. ЭДС в этой части катушки не индуцируется. Часть II находится в воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и цилиндрическим сердечником. Магнитный поток, пронизывающий витки этой катушки, не изменяется во времени, число витков также остается постоянным. В этой части катушки ЭДС также не наводится. Часть III катушки находится вне воздушного зазора, но внутри магнитной системы. Магнитный поток, проходящий через витки этой катушки, также постоянен, но при вибрации катушки изменяется число витков. Изменение числа витков приводит к изменению потокосцепления и наводит ЭДС. Витки катушки обычно наматываются равномерно. При этом ЭДС преобразователя пропорциональна скорости вибрации

Индукционные преобразователи могут применяться и для измерения угловой виброскорости. Схема такого преобразователя показана на рисунке 20б. Он состоит из постоянного магнита 1, полюсных наконечников 2, цилиндрического стального сердечника 3 и катушки 4. Устройство преобразователя аналогично устройству магнитоэлектрического измерительного механизма. При повороте катушки вокруг оси сердечника ее потокосцепление с полем постоянного магнита изменяется и в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная угловой скорости перемещения объекта измерения.

*Тахометрические преобразователи.* Преобразователи этого типа представляют собой электромашинные генераторы. В качестве примера рассмотрим синхронный преобразователь с вращающимся постоянным магнитом (рисунок 21а).

ЭДС индуцируется в данном преобразователе за счет изменения магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом при его вращении. Частота его выходного сигнала равна или кратна частоте вращения вала. Преобразователь состоит из статора 1, на котором намотана обмотка, и ротора 2 с закрепленным на нем постоянным магнитом. Статор выполнен в виде полюсных наконечников, изготовленных из магнитомягкого материала, с цилиндрической расточкой. При вращении магнита изменяется магнитный поток, проходящий через обмотку, и в ней индуцируется переменная ЭДС.



Амплитуда и частота ЭДС пропорциональны частоте вращения ротора. Частота выходного сигнала определяется соотношением  $f = \frac{n \cdot p}{60}$ , где  $n$  - частота вращения, об/мин;  $p$  - число пар полюсов.

На рисунке 21б приведена схема тахометрического преобразователя постоянного тока с возбуждением от постоянного магнита, расположенного на статоре 1. измерительная обмотка расположена на роторе 2, в которой при вращении образуется переменная ЭДС, снимаемая с вращающегося ротора с помощью коллектора 3 и скользящих по нему щеток. При этом переменная ЭДС выпрямляется.

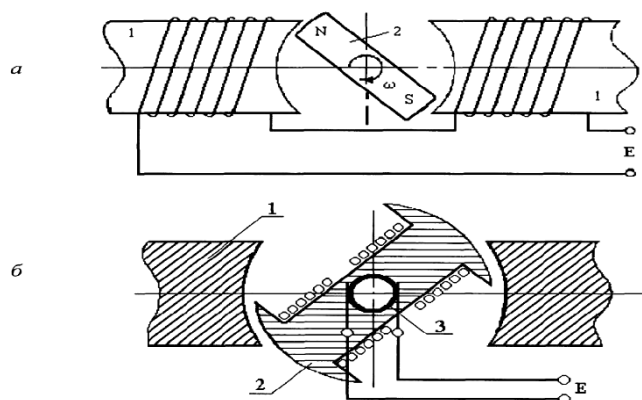


Рисунок 21 - Устройство тахометрических преобразователей: а- с неподвижной катушкой и подвижным магнитом; б – с подвижной катушкой и неподвижным магнитом

При подключении измерительного прибора к преобразователю последний отдает в измерительную цепь некоторую электрическую мощность, которая оказывается прямо пропорциональной механической мощности. Механическая мощность определяется соотношением:

$$P_M = \omega \cdot M, \tag{98}$$

где  $\omega$ - угловая частота вращения ротора;

$M$ - необходимый для этого момент, связанный с электрической мощностью выражением:

$$M = \frac{P_{эл}}{\eta \cdot \omega} \tag{99}$$

где  $\eta$ - КПД.

Из приведенных соотношений видно, что с увеличением ЭДС генерируемой преобразователем, увеличивается механическая мощность на его валу.

*Параметрические преобразователи.* В параметрических преобразователях некоторые параметры выходного комплексного сопротивления могут изменяться под воздействием измеряемой величины. Комплексное сопротивление преобразователя, с одной стороны, обусловлено геометрией и размерами его элементов, а с другой - свойствами материалов: удельным сопротивлением, магнитной проницаемостью и диэлектрической постоянной.

Изменения комплексного сопротивления могут быть, таким образом, вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов преобразователя, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и на другое одновременно. Геометрические размеры преобразователя и параметры его комплексного сопротивления могут изменяться, если преобразователь содержит подвижный или деформирующийся элемент.

Каждому положению подвижного элемента преобразователя соответствует определенное комплексное сопротивление, и измерение его параметров позволяет узнать положение элемента. На этом принципе работает большое число преобразователей положения и перемещения объектов: потенциометрических, индуктивных с подвижным сердечником, емкостных.

Деформация является результатом действия силы (или величины, с ней связанной, - давления, ускорения) на чувствительный элемент преобразователя.

Изменение комплексного сопротивления преобразователя, вызванное деформацией чувствительного элемента, вызывает изменение соответствующего электрического сигнала в специальной измерительной схеме, в которую этот преобразователь включают.

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента преобразователя зависят от переменных физических величин: температуры, давления, влажности, освещенности и т.д. Если меняется только одна из величин, а остальные поддерживаются постоянными, то можно оценить существующее однозначное соответствие между значениями этой величины и комплексным сопротивлением преобразователя. Это соответствие описывается градуировочной кривой. Зная градуировочную кривую, по результатам измерения комплексного сопротивления можно определить соответствующее значение измеряемой величины.

В таблице 7 приведен ряд физических эффектов, связанных с преобразованием неэлектрических величин с помощью параметрических преобразователей. Среди них следует специально отметить резистивные преобразователи.

Полное сопротивление параметрического преобразователя и его изменения можно измерить, включив преобразователь в специальную электрическую цепь, содержащую источник питания и схему формирования сигнала. Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов:

- потенциометрическая схема, содержащая соединенные параллельно источник напряжения и преобразователь-потенциометр;

Таблица 7 – Физические эффекты

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Перемещение	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
	Диэлектрическая проницаемость	
Уровень жидкости	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

- мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение комплексного сопротивления преобразователя;

- колебательный контур, включающий в себя полное сопротивление преобразователя (при этом контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту);

- операционный усилитель, в котором сопротивление преобразователя является одним из элементов, определяющим коэффициент его усиления.

*Комбинированные преобразователи.* При измерениях некоторых неэлектрических величин не всегда удастся преобразовать их непосредственно в электрическую величину. В этих случаях осуществляют двойное преобразование исходной (первичной) измеряемой величины в промежуточную неэлектрическую величину, которую преобразуют затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух соответствующих измерительных преобразователей образует комбинированный преобразователь (рисунок 22).

Подобные преобразователи удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента, к которым чувствителен вторичный преобразователь.

Давление, например, можно измерить с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину преобразователем, реагирующим на механическое смещение.



Рисунок 22 - Структурная схема комбинированного преобразователя

2. *Измерение неэлектрических величин.* Неэлектрические величины приходится измерять при научных исследованиях, например при изучении новых физических явлений, космоса, океана, недр земли, при определении состава и свойств веществ и новых материалов, при контроле и управлении технологическими производственными процессами, при контроле качества выпускаемой продукции и т.д.

В измерении большого числа неэлектрических величин нуждается сельское хозяйство, медицина, служба охраны окружающей среды.

Ввиду большого разнообразия, как выпускаемых средств измерений, так и числа неэлектрических величин, которые необходимо измерять, невозможно рассмотреть измерения всех или даже значительного числа этих величин. Поэтому здесь рассматриваются измерения только некоторых величин, наиболее часто встречающихся в промышленности и при научных исследованиях. Например, необходимость измерения температуры, определение концентрации газообразных и жидких сред, давления жидкостей и газов встречается в химических производствах, в газовой и нефтяной промышленности, металлургии, теплоэнергетике, пищевой промышленности, в сельском хозяйстве, медицине, в службах охраны окружающей среды и т.п.

Измерения давлений, размеров, перемещений осуществляются в машиностроении, приборостроении, в частности в гибких автоматизированных производствах с использованием промышленных роботов. Поэтому рассматриваются измерения температуры, давления, размеров и расстояний, концентрации жидких и газообразных сред.

*Измерения температуры.* Диапазон измеряемых в настоящее время температур очень широк: от температур, близких к «абсолютному нулю», до температур, достигающих десятков тысяч градусов. На практике наиболее часто требуется измерять стационарные или медленно изменяющиеся температуры (скорость примерно  $1^{\circ}\text{C}$  в минуту). Вместе с этим встречается необходимость в измерении температур, изменяющихся на сотни градусов в секунду, например температур в газовоздушном тракте авиационного двигателя.

Предельная точность измерений определяется точностью эталона температуры, который состоит из аппаратуры для воспроизведения шкалы между реперными точками. Наименьшая погрешность воспроизведения

единицы температуры в диапазоне от  $-200$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$  характеризуется средним квадратическим отклонением результатов измерения  $S$ , не превышающим  $0,0005^{\circ}\text{C}$  при неисключенной систематической погрешности, не превышающим  $0,0002^{\circ}\text{C}$ . Единица температуры за пределами указанной области воспроизводится со значениями  $S = 0,02^{\circ}\text{C}$  и  $S = 0,005^{\circ}\text{C}$ .

Средства измерений температуры разнообразны и различаются диапазонами измерений, типом используемого термопреобразователя, наличием или отсутствием контакта между термопреобразователем и объектом измерений. По последнему признаку все средства измерений температуры делят на контактные и бесконтактные.

Средства для бесконтактных измерений применяют в случаях, когда измеряемая температура превышает  $2500^{\circ}\text{C}$ , когда контакт термопреобразователя с объектом измерения затруднен или невозможен (движущийся или удаленный объект, агрессивная среда и т.п.) или когда недопустимо искажение температурного поля объекта за счет размещения в нем термопреобразователя.

Для измерения температуры в зависимости от ее значения, требуемой точности и условий измерений могут быть использованы различные приборы.

*Измерения линейных размеров и расстояний* от долей микрометров до 100 мм часто встречаются в машиностроении. Для измерения таких величин используют аналоговые и цифровые приборы. В аналоговых приборах с индуктивными и емкостными преобразователями приведенная погрешность составляет  $\pm 1\%$ . При измерении линейных размеров на металлорежущих станках с числовым программным управлением применяют цифровые приборы с кодирующими преобразователями линейных перемещений. Погрешность измерения размеров такими приборами в пределах 10 мм не превышает 0,3 мкм.

Для точных измерений малых длин в пределах единиц и десятков миллиметров, а также шероховатости поверхностей применяют приборы с лазерными интерферометрами, приведенная погрешность которых  $\pm 0,0025\%$ . Применение лазерной техники позволяет осуществлять бесконтактный контроль и измерение размеров объектов, находящихся в труднодоступных местах, в сложных условиях производства (изготовление деталей в вакууме, при высоких или низких температурах и т.п.).

*Измерения уровней жидких и сыпучих материалов* в пределах от 100 мм до 100 м обычно производят аналоговыми приборами прямого и уравновешивающего преобразования с преобразователями больших перемещений (реостатными, емкостными). Измерение уровней в широком диапазоне изменений с приведенной, погрешностью  $\pm 2,5\%$  обеспечивают емкостные уровнемеры. Их применяют при измерении уровня жидкости, находящейся при повышенном давлении, взрывоопасной жидкости. Для бесконтактных измерений уровня различных веществ используют ионизационные, ультразвуковые или акустические уровнемеры.

Для измерения больших расстояний (десятки километров) с высокой точностью получили распространение цифровые лазерные дальномеры. Серийно выпускаемые лазерные дальномеры используют для измерения расстояний до 20-30 км в любое время суток с погрешностью  $\pm 10$  мм. Лазерные дальномеры используют также при исследовании космического пространства («Луноход-1» для измерения расстояний был снабжен лазерным дальномером). При измерении расстояний, достигающих сотен и тысяч километров, применяют радиодальномеры.

Измерения геометрических размеров и расстояний производятся при работе промышленных роботов. В роботах эти функции выполняются как аналоговыми преобразователями перемещений (реостатными, индуктивными), так и цифровыми (считывания). Для определения расстояний движущиеся элементы робота оснащаются лазерными дальномерами дальнего (до 10 м), ближнего (до 10 см) и сверхближнего (доли миллиметров) действия, позволяющие роботу автоматически ориентироваться в зоне обслуживания и перемещать требуемые предметы. Точность определения положения (точность позиционирования) современных роботов характеризуется погрешностью  $\pm (0,05-0,1)$  мм при расстояниях 30-50 мм и  $\pm 1^\circ$  угла поворота в пределах  $180^\circ$ .

Измерения концентрации компонентов газообразных и жидких сред. В промышленном производстве, сельском хозяйстве, при научных исследованиях, в процессе контроля качества окружающей среды, в медицине и т.д. необходимо производить анализ газовых и жидких сред. Основной задачей анализа является определение вида компонентов этих сред и измерение их концентраций.

*Измерения концентрации газов.* При анализе состава газов чаще всего приходится измерять концентрацию кислорода, водорода, оксида и диоксида углерода, озона, метана, сернистых соединений и т.п. Диапазон измеряемых концентраций газов необычайно широк. Для газов, используемых в технологических процессах производства, измеряемые концентрации достигают единиц и десятков процентов, например концентрация водорода в системах охлаждения электрических машин, кислорода в металлургии и др. Концентрация газов, представляющих опасность для населения и окружающей среды, не должна превышать долей и единиц процентов. Нормальная концентрация, например, озона в воздухе составляет  $7 \cdot 10^{-6}$  %, углекислого газа  $3 \cdot 10^{-2}$  %, оксида углерода  $10^{-10}$  % и т.д.

Точность измерения концентрации газов определяется в значительной мере состоянием метрологического обеспечения приборов газового анализа. С учетом трудности изготовления и хранения образцовых газовых смесей, используемых при градуировке и поверке соответствующих приборов, эта точность для концентраций более 0,1 % характеризуется минимальной погрешностью  $\pm 0,5$  %. При измерении концентраций менее 0,1 % погрешность превышает  $\pm 1$  %.

Для измерения концентрации газов используют газоанализаторы. Для измерения и регистрации концентрации смесей (обычно двухкомпонентных)

применяют автоматические газоанализаторы с приведенной погрешностью  $\pm(2,5-5) \%$ .

При контроле топочных режимов на теплоэлектростанциях при испытаниях двигателей, работающих на жидком топливе, при осуществлении мер защиты атмосферы от продуктов неполного сгорания топлива и т. п. необходимо измерять концентрацию газов CO и CO<sub>2</sub>. Для измерения концентрации CO<sub>2</sub> обычно используют приборы, основанные на изменении теплопроводности газов. С их помощью измеряют концентрацию CO<sub>2</sub> с приведенной погрешностью  $\pm 2,5 \%$  в диапазонах концентраций 10-40 %.

Измерения концентрации водорода в пределах до 80 % производят также тепловыми газоанализаторами с приведенной погрешностью  $\pm 1,5\%$ . Для измерения концентрации кислорода используют приборы, основанные на парамагнитных свойствах кислорода, - термомагнитные газоанализаторы. С их помощью определяют концентрацию кислорода в воздухе, а также в промышленных смесях (до 80 - 100 %) с приведенной погрешностью  $\pm(3-5) \%$ .

Для бесконтактных измерений концентраций агрессивных или взрывоопасных газов (сернистый газ, сероводород и др.) используют ионизационные газоанализаторы, способные к тому же работать при повышенных давлениях и влажности газов.

Точные измерения (с погрешностью примерно  $\pm 1 \%$ ) концентраций сложных газовых смесей с одновременным определением их состава осуществляют оптическими газоанализаторами (спектрофотометрами) или хроматографами. Спектрофотометры используют при исследованиях атмосферы Земли и других планет.

*Измерения концентрации растворов.* В лабораторной и производственной практике чаще всего требуется измерять концентрацию водных растворов. Компонентами водных растворов бывают неорганические вещества (металлы, соли, кислоты, основания и т.д.) и органические (нефтепродукты, микроорганизмы и др.).

Диапазон измеряемых концентраций таких компонентов различен. Например, в природной воде концентрация солей может меняться от 0,01 до 100 мг/л, концентрация в ней нефтепродуктов не должна превышать  $5 \cdot 10^{-5}$  мг/л, концентрация водородных ионов, характеризующая кислотность или щелочность водных растворов, изменяется от  $10^{-11}$  до 1 г-ион/л и т.д.

Разнообразие анализируемых растворов, широкий диапазон измеряемых концентраций, специфика создания и хранения образцовых растворов ограничивают точность используемых средств измерений. В среднем приведенная погрешность приборов, используемых для измерения концентраций растворов, составляет  $\pm(0,5-2,5) \%$ .

В теплоэнергетике, пищевой промышленности, в службах водоснабжения необходим контроль жесткости воды, характеризуемой концентрацией в ней солей Ca, Na и Mg. Для измерения концентрации солей в воде применяют кондуктометры (солемеры) с электролитическими преобразователями; приведенная погрешность  $\pm 1,5 \%$ . Кондуктометры также используют при изме-

рении концентрации кислот в воде. Автоматические измерения и регистрация концентраций жидких сред с выдачей унифицированного электрического сигнала производят автоматические кондуктометры ГСП с приведенной погрешностью  $\pm(1-2,5) \%$ .

В настоящее время необходимость измерять параметры магнитных полей возникает во многих областях науки и техники. Каждая из этих областей предъявляет свои требования к диапазону и точности измерений, частотному диапазону измеряемых величин, условиям эксплуатации средств измерений. Так, например, магнитную индукцию необходимо измерять в диапазоне от  $10^{-14}$  до  $10^2$  Тл, частотный диапазон полей колеблется в пределах от нуля до нескольких десятков мегагерц. Погрешность измерения должна быть в пределах от тысячных долей до единиц процентов.

Для измерения параметров постоянных магнитных полей широко используется индукционно-импульсный способ. Схема измерения этим способом приведена на рисунке 23, где ИК - измерительная катушка; БГ - баллистический гальванометр; М - образцовая катушка взаимной индуктивности.

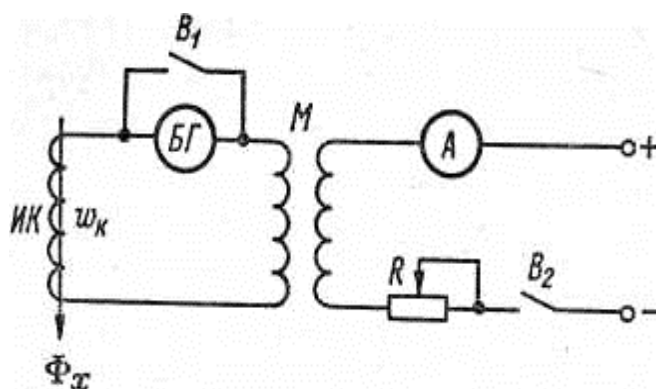


Рисунок 23 - Схема измерения магнитного потока индукционно-импульсным методом с помощью баллистического гальванометра

При изменении потока, сцепленного с витками измерительной катушки ИК, например от  $\Phi_x$  до 0, на зажимах измерительной катушки возникает ЭДС, которая уравнивается падением напряжения и ЭДС индуктивности в цепи гальванометра.

Датчики неэлектрических величин. Для электрических измерений неэлектрических величин применяются специальные датчики. Принцип их действия основан на различных физических явлениях. Основной квалификационной характеристикой является заложенный физический принцип измерения и построения датчиков.

*Резистивные датчики* – преобразуют измеряемую величину в омическое сопротивление. Наиболее часто такие датчики применяются для измерения перемещений, для измерения уровня жидкости и пр. На первом этапе измеряемая величина преобразуется в перемещение движка переменного



резистора. Общий вид и рабочие характеристики резистивного датчика показаны на рисунке 24. При этом:  $R1 + R2 = R_0$ .

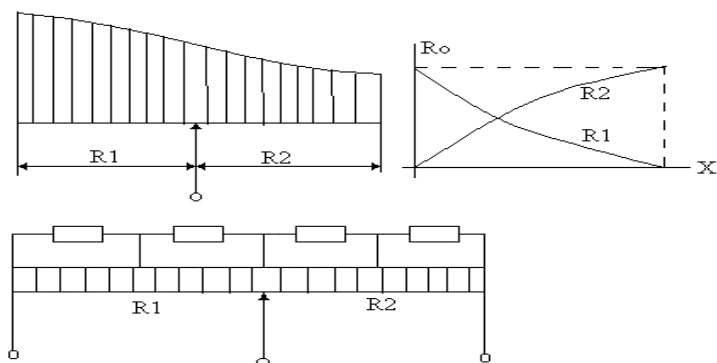


Рисунок 24 - Резистивный датчик

Если обозначить  $X$  - угловое или линейное перемещение движка тогда:  
 $R = f(X)$ .

Резистивные преобразователи применяются в системах, где прилагаемое усилие больше или равно  $10^{-2}$  Н. Величина перемещения больше или равно 2 мм. Частота питания меньше или равна 5 Гц.

*Тензодатчики* используют для исследования механических напряжений.

Простейший тензодатчик представляет из себя пленку с наклеенной на нее проволокой очень маленького диаметра 0.02 - 03 мм. Ширина наклейки –  $a$ , длина проволоки –  $l$ . Датчик крепится к исследуемой поверхности. При деформациях изменяется длина провода и, следовательно, его сопротивление. По этим изменениям судят о деформациях объекта (рисунок 25).



Рисунок 25 - Тензодатчик

*Пьезорезистивные преобразователи* сил давления и деформации.

Устройство датчика следующее: между металлизированными обкладками находится пьезочувствительный элемент. Если приложить силу к обкладкам, сопротивление элемента будет изменяться (на практике это изменения бывают в несколько раз). По изменению сопротивления судят о приложенной силе или деформации. Устройство датчика показано на рисунке 26.

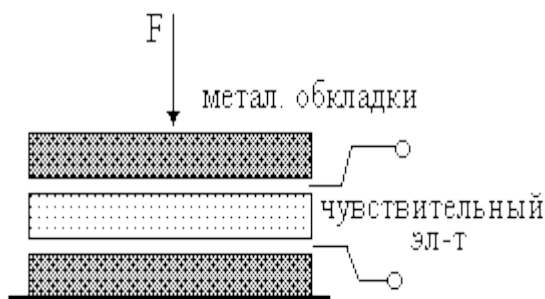


Рисунок 26 - Пьезорезистивный датчик (пьезодатчик)

*Магнитоупругие датчики* – применяют для измерения больших сил ( $F=10^5 \dots 10^6$  Н). Датчик устроен следующим образом: В диэлектрическом материале большой твердости залиты две взаимно перпендикулярные катушки. Если на первую катушку подать переменное напряжение, на второй катушке будет индуцироваться ЭДС равная нулю. В случае приложения к датчику силы, происходит деформация материала, вследствие чего изменяется пространственное положение катушек и на второй катушке появляется ЭДС отличная от нуля. Устройство датчика показано на рисунке 27.

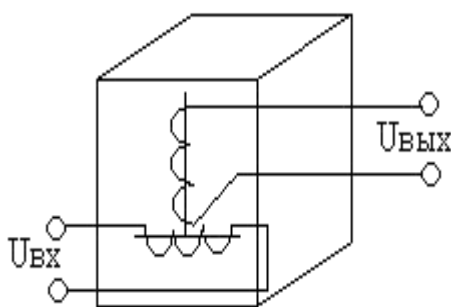


Рисунок 27 -Магнитоупругий датчик

Размеры датчика: высота меньше 5мм, площадь до 10 см<sup>2</sup>.

Статическое сопротивление  $R_{стат} = 10 \dots 10^8$  Ом.

*Электромагнитные датчики перемещения и деформаций*

Принцип действия этих датчиков основан на взаимодействии магнитных потоков. О величине перемещения или деформации судят по изменению тока в катушке индуктора. Различные схемы электромагнитных датчиков приведены на рисунке 28.

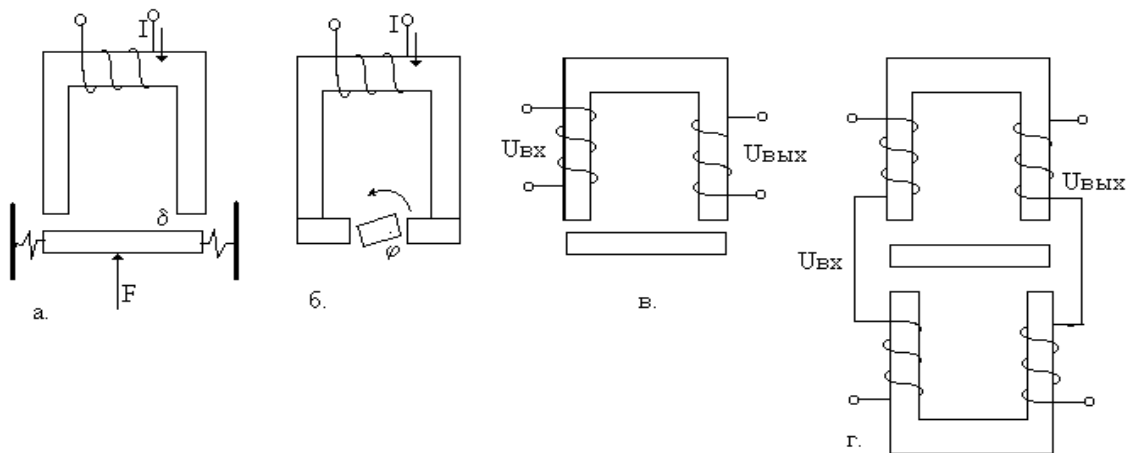


Рисунок 28 - Электромагнитные датчики перемещения и деформаций: а - датчик линейных перемещений; б - датчик угловых перемещений; в - трансформаторная схема подключения датчика; г - дифференциальная схема датчика

### Контрольные вопросы:

1. Как классифицируются преобразователи неэлектрических величин в электрические?
2. Перечислите достоинства и недостатков генераторных преобразователей?
3. Перечислите достоинства и недостатков параметрических преобразователей?
4. Чем отличаются параметрические преобразователи от генераторных?
5. На каком физическом принципе основана работа тахометрических преобразователей?
6. Чем объясняется широкое применение электрического измерения неэлектрических величин?
7. Что такое датчик?
8. На чем основан принцип действия тензодатчиков?
9. Для чего применяются пьезодатчики?
10. Устройство и принцип действия электромагнитных датчиков перемещения и деформаций?

### 7 Сравнивающие устройства

#### План:

1. Назначение и классификация сравнивающих устройств. Их конструкция и принцип действия.

1 Сравнивающие устройства в наиболее распространенном случае измеряют разность  $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$ , пропорциональную отклонению управляемой величины от ее заданного значения. На рисунке 29 приведены некоторые наиболее распространенные в сельскохозяйственной автоматике сравнивающие устройства.

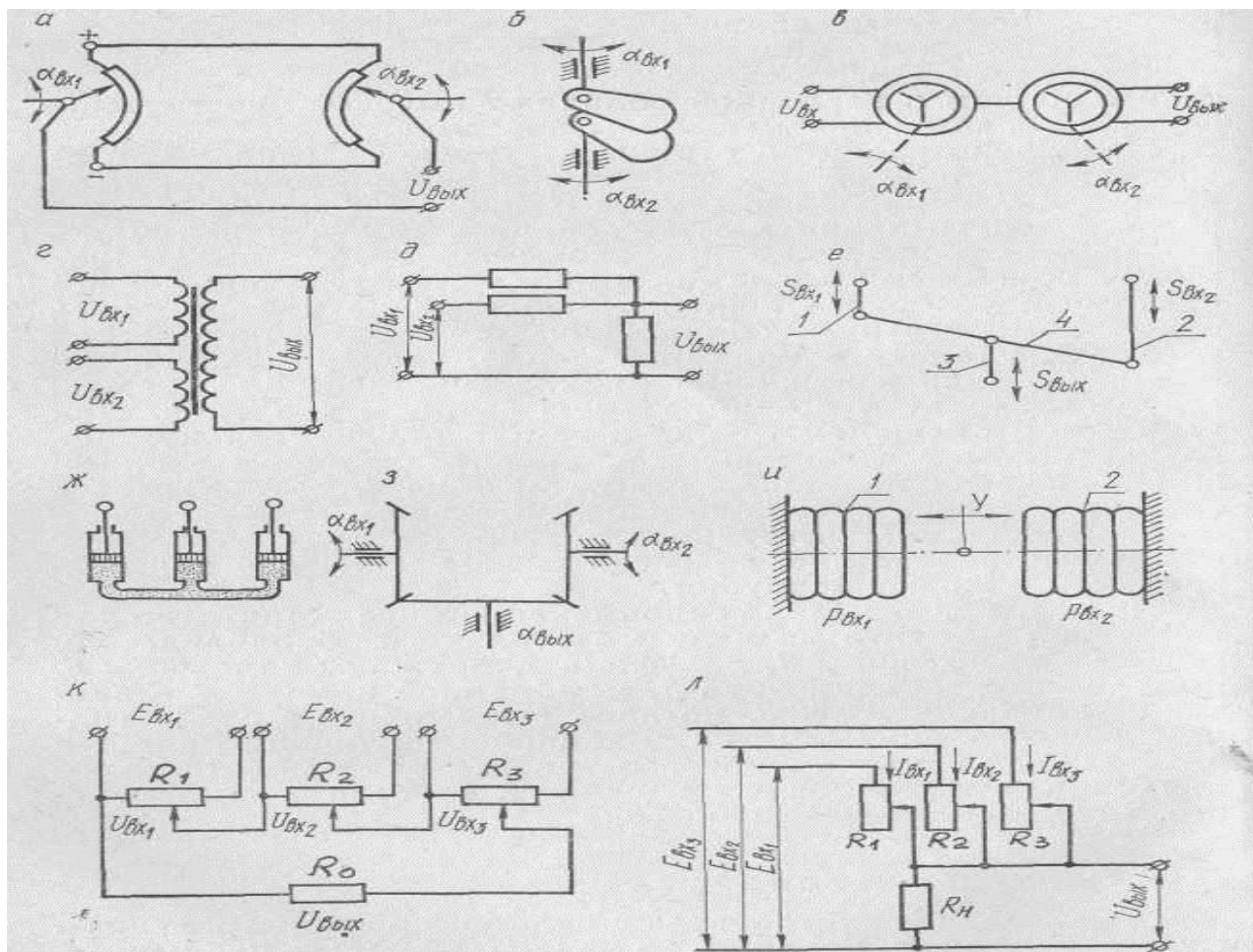


Рисунок 29 – Наиболее распространенные сравнивающие устройства

Например, сравнивающее рычажное устройство (рисунок 29е) выполняет функцию сложения (вычитания) двух сигналов. Оно состоит из стержней 1,2,3 и рычага 4. При перемещении стержня 1 на величину  $S_{BX1}$ , а стержня 2 на величину  $S_{BX2}$  стержень 3 переместится на величину  $S_{ВЫХ}$ . Из плана перемещений можно определить:

$$S_{\text{вых}} = S_{\text{вх1}} \frac{l_2}{l_1 + l} + S_{\text{вх2}} \frac{l_1}{l_1 + l_2}. \quad (100)$$

В механических суммирующих устройствах выполняется алгебраическое суммирование усилий или перемещений, при этом выходной величиной суммирующих устройств является перемещение.

В ряде случаев задача суммирования выполняется настолько просто, что специальное суммирующее устройство отсутствует. Примером может служить простейшее суммирующее (вычитающее) устройство, показанное на рисунке 29ж.

Алгебраическое суммирование электрических напряжений (токов) может выполняться двумя способами: последовательного (рисунок 29к) и параллельного (рисунок 29л) сложения.

Последовательная схема позволяет также суммировать сопротивления, если вместо входных ЭДС ( $E_{вх}$ ) подавать постоянные по величине напряжения питания. Эти схемы часто используются для сравнения двух сопротивлений в реверсивных схемах усилителей.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Для чего служат сравнивающие устройства?
2. Объясните принцип действия сравнивающих устройств различного вида.

### 8 Задающие устройства

#### **План:**

1. Назначение и классификация задающих устройств. Их конструкция и принцип действия.

1. Задающее устройство формирует задающее воздействие  $x_I(t)$ , определяющее требуемое значение управляемой величины и преобразует его в однозначно соответствующую величину  $x(t)$ , удобную для сравнения с  $y(t)$ .

В качестве задающего устройства могут быть различные носители программы: кулачковые механизмы, функциональные потенциометры, перфокарты, магнитные пленки и кинопленки и т.п.

Программные задающие устройства бывают в виде механических копиров с механической передачей программы (кулачки) и с электромеханической передачей программы (рисунок 30а). Двигатель 1 поворачивает токопроводящий кулачок 6, при этом создается контакт с рычагом 4 и замыкается цепь реверсивного двигателя 2, который переместит рычаг в сторону от кулачка до разрыва цепи. Рычаг связан с контактной системой 3 регулирующего устройства. Пишущее перо 5 осуществляет запись параметра.

Потенциометрические задатчики бывают в виде профильных (рисунок 30в), ступенчатых с переменным шагом намотки и шунтированных сопротивлениями потенциометров.

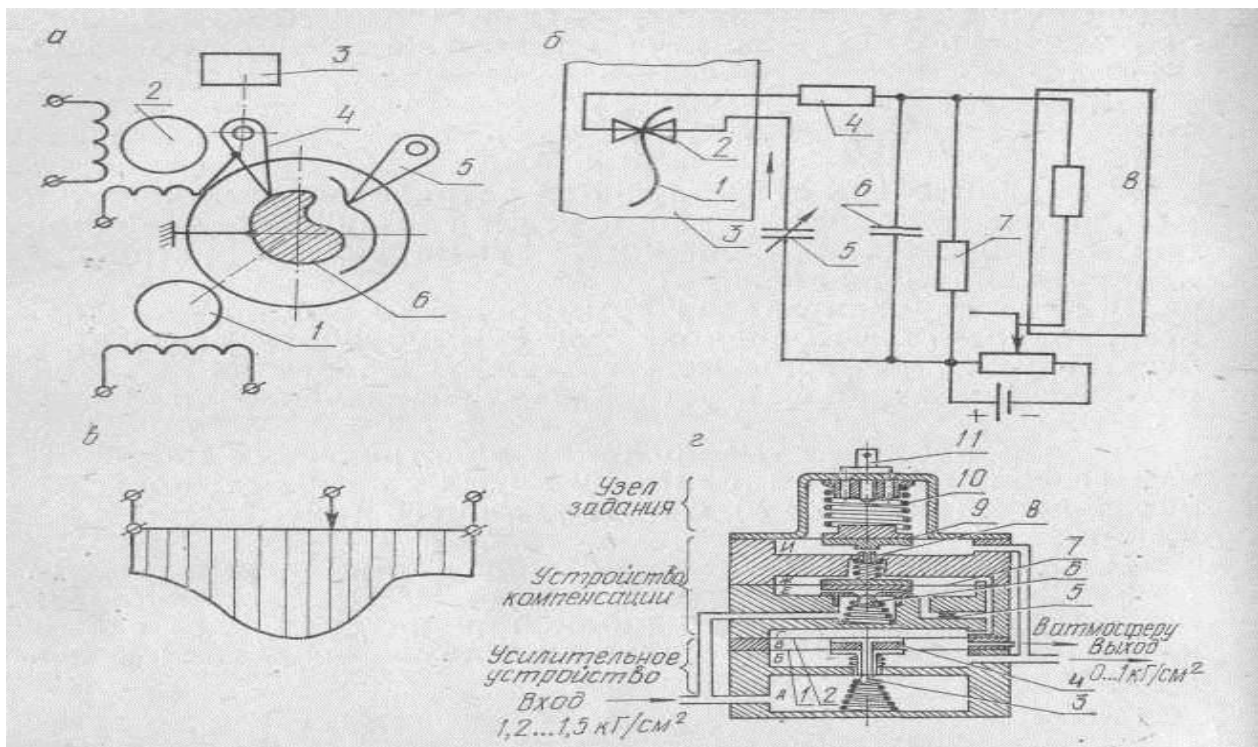


Рисунок 30 - Задающие устройства

Программоносители в виде токопроводящей линии с контактным слежением (рисунок 30б) представляют собой диаграммную бумагу 3 с программой в виде кривой 1 из токопроводящей массы (9 частей - тушь, одна часть - графит). Слежение за линией осуществляет головка, снабженная двумя ламелями (щупами) 2. При выходе контактов на полосу сопротивление между контактами резко падает и равновесие мостовой схемы, куда включено сопротивление, нарушается. Сигнал разбаланса поступает на усилитель 8, на выходе которого включено поляризованное реле, управляющее реверсивным двигателем, при этом головка устанавливается в необходимое положение. Другой разновидностью программносителя является диаграммная лента 3, на которую обычным карандашом типа 2М наносится программная линия шириной 2 мм. Когда оба щупа находятся на программной линии, происходит замыкание электрической цепи заряда конденсатора 6 от источника 5 через сопротивление 4. При этом на усилитель самописца 8 поступает сигнал, и каретка со щупами смещается к левому краю программной линии; при сходе одного щупа с линии зарядная цепь обрывается, и конденсатор 6 разряжается через сопротивление 7; напряжение, поступающее на самописец, уменьшается, и каретка перемещается вправо на линию, и весь цикл повторяется.

Часто задающее устройство конструктивно объединяется в одно целое с измерительным или сравнивающим устройствами. В современных пневматических регуляторах, построенных по принципу компенсации сил, задание вводится в виде давления, создаваемого задатчиком (рисунок 30г).

Давление питания подводится через камеру А к шариковому клапану 3 усилительного реле и одновременно через камеру Д в дополнительное

клапанное устройство, зазор между шариком 6 и седлом которого обеспечивает прохождение воздуха к дросселю 5. При вращении ручки задатчика 11 движение передается на винт пружины 10, которая, сжимаясь, воздействует на мембрану 9, в центре которой находится заслонка сопла 8. При приближении заслонки 9 к соплу 8 давление в полостях Ж и Г повышается, и мембраны 4 усилительного реле, прогибаясь, открывают шариковый клапан 3 усилительного реле. При этом воздух поступает на выход задатчика и в систему обратной связи под давлением, которое будет повышаться до тех пор, пока усилие, вызванное этим давлением на мембраны 9, не уравнивает усилие сжатия пружины 10. Таким образом, создается постоянное соответствие между сжатием и давлением на выходе задатчика.

### **Контрольные вопросы:**

1. Для чего служат задающие устройства?
2. Объясните принцип действия задающих устройств различного вида.

## 9 Усилители

### **План:**

1. Классификация усилителей.
2. Конструкция и принцип действия усилителей различного типа.

1. **Усилителем** называется устройство, в котором происходит усиление выходного сигнала датчика или сигнала, прошедшего через преобразовательный элемент до значений, при которых они достаточны для питания исполнительных элементов за счет энергии дополнительного источника. В усилителях входная и выходная величины имеют одинаковую физическую природу. Усилитель может быть выполнен как самостоятельный элемент автоматической системы или входит в состав датчика или исполнительного механизма.

По виду используемой энергии усилители подразделяются на: гидравлические, пневматические, электрические, механические, а по виду статических характеристик на линейные, нелинейные (нелинейность обусловлена зоной нечувствительности) и релейные.

Основными характеристиками усилителя являются: коэффициент усиления, чувствительность, быстродействие, точность воспроизведения на выходе изменений входной величины, линейность. Выбор и расчет усилительных устройств автоматической системы производится после выбора первичных преобразователей и исполнительных устройств.

2. Рассмотрим конструкцию и принцип действия некоторых усилителей.

#### **1) Гидравлические и пневматические усилители.**

Основной принцип действия гидравлических и пневматических усилителей - управление с помощью механического перемещения каких-либо элементов потоком жидкости или газа. С точки зрения герметизации питающей системы гидравлические усилители уступают пневматическим, в которых

используются маломощные системы для привода и не требуется компенсация гидродинамических усилий.

Широкое применение находят дроссельные и струйные усилители. Среди дроссельных усилителей наиболее распространены золотниковые и типа сопло-заслонка.

**Золотниковые усилители.** Основной частью усилителя является золотниковая пара, состоящая из втулки (цилиндра) со щелями, внутри которой перемещается золотник. В зависимости от назначения применяют одно-, двух- и четырехщелевые золотниковые пары, изготовленные с высокой точностью (поле допуска не превышает нескольких микрон).

В пневматических' усилителях золотниковые пары работают без смазки при малом зазоре между золотником и втулкой. Это требует высокой точности изготовления и качества применяемых материалов. Гидравлические сопротивления окон золотниковых пар определяют по экспериментальным расходным характеристикам:

$$Q = f(\delta) \text{ при } \Delta = const, \quad (101)$$

где  $\Delta p$  - перепад давления на щели,  $Q$  - расход,  $\delta$  - зазор между золотником и втулкой.

Диаметр золотника  $d_{зол}$  определяется в зависимости от расхода жидкости  $Q$  при постоянном давлении  $p_0$  в магистрали.

На рисунке 31а приведена схема гидравлического поршневого усилителя с золотниковым управлением. В исходном положении под воздействием пружин 1, 2 полностью перекрыты соединительные каналы между золотниковым 3 и силовым 4 цилиндрами. При перемещении  $x$  (например влево) штока 5 золотника открываются каналы 6, и жидкость под давлением  $p_0$  поступает в левую полость силового цилиндра 4 и вытесняется из правой части его. При этом давление  $p_1$  превысит давление  $p_2$ , и шток 7 силового цилиндра будет перемещаться вправо. При изменении направления движения золотника изменяется также направление перемещения поршня силового цилиндра.

Статическая скоростная характеристика этого усилителя нелинейная (рисунок 31б). Наличие зоны нечувствительности  $2x_0$  объясняется тем, что в исходном положении золотник перекрывает входное ( $b > a$ ) отверстие, т.е. используется отсечной золотник. Для устранения зоны нечувствительности применяют проточные золотники, обеспечивающие дополнительный небольшой расход жидкости, что позволяет использовать усилители при низких температурах. Тогда скоростная характеристика в рабочей части может быть аппроксимирована прямой (линия 1 на рисунке 31б).



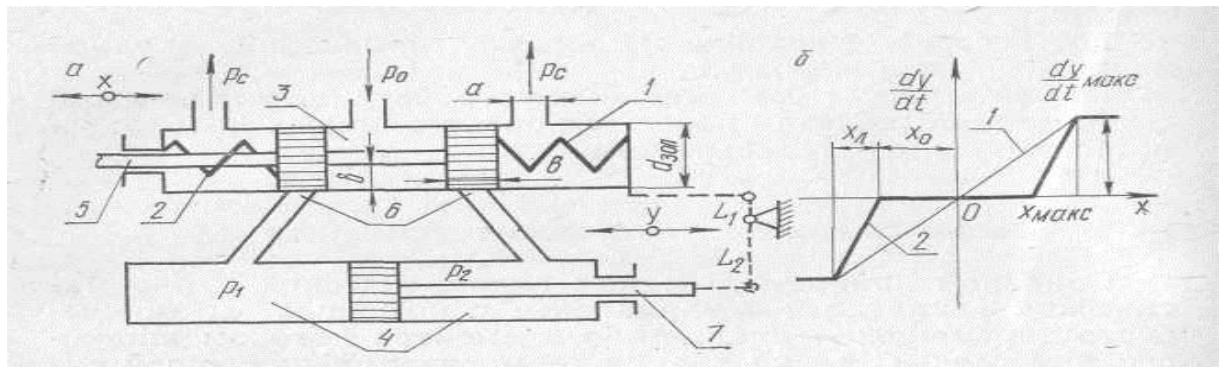


Рисунок 31 - Золотниковый усилитель

Усиление обеспечивается вспомогательной энергией жидкости, нагнетаемой насосом и стабилизируемой по давлению гидросопротивлением.

Для того чтобы движение поршня силового цилиндра точнее повторяло входное перемещение золотника, используют жесткую обратную связь в виде рычага длиной  $L_1 + L_2$ , концы которого соединены с золотниковым цилиндром и штоком поршня силового цилиндра (штриховая линия на рисунке 31а). В отличие от рассматриваемой выше схемы золотниковый цилиндр подвижный. Входное перемещение штока золотника будет вызывать движение поршня силового цилиндра и цилиндра золотника до тех пор, пока отверстия не будут перекрыты.

Коэффициент усиления  $k$  достигает  $10^3 - 10^4$ .

**Усилитель типа сопло-заслонка** (рисунок 32а) состоит из дросселя 1 с постоянным гидравлическим сопротивлением, заслонки 3 и силового цилиндра 4. Рабочая жидкость под постоянным давлением подается в усилитель через дроссель 1. В зависимости от положения заслонки 3 между дросселями 1, 2 устанавливается давление  $p$ , которое передается под поршень 4 и заставляет его перемещаться до тех пор, пока не установится новое равновесие между силой упругости пружины 5 и силой, приложенной к поршню 4. При изменении  $h$  изменяется расход рабочей жидкости через сопло 2, вследствие чего изменяется давление  $p$  этой жидкости, воздействующей на перемещение поршня 4, и поршень перемещается в ту или другую сторону. Подбор профиля заслонки позволяет получить линейную зависимость между положением заслонки и давлением  $p$ .

Конструктивное исполнение усилителей типа сопло-заслонка может быть весьма различно. Наиболее часто применяют дифференциальные схемы, обладающие большой чувствительностью и усилением. Коэффициент усиления их достигает  $10^6$ .

Схема гидравлического **усилителя со струйной трубкой** приведена на рисунке 32б. Скоростной напор жидкости, вытекающей из мундштука 1 струйной трубки 2, превращается при ее отклонении от среднего положения в переменное давление рабочей жидкости в отходящих от сопла трубках 3, 4. Струйная трубка 2 вращается около полой цапфы 5, в которую подается рабочая жидкость (масло) под давлением  $p_0$ . Вытекающая из мундштука 1 струя

жидкости попадает в оба канала приемного сопла, где скоростной напор превращается в давление, передаваемое через жидкость в полости 6, 7 сервомотора. При среднем положении струйной трубки 2 струя масла развивает одинаковое давление в приемных соплах 3, 4 и в связанных с ними полостях 6, 7 сервомотора, и поршень 8 остается неподвижным. При отклонении струйной трубки 2 от среднего положения давление в одном из сопел, в сторону которого отклонилась трубка, увеличивается, а в другом падает. Появляется разность давлений в полостях сервомотора, и его поршень 8 начинает двигаться, перемещая шток 9 и связанный с ним регулирующий орган в определенном направлении. Разность давлений, а, следовательно, и скорость движения поршня, пропорциональны отклонению струйной трубки от своего среднего положения. Это отклонение в свою очередь пропорционально изменению регулируемой величины. Следовательно, скорость перемещения регулирующего органа приблизительно пропорциональна отклонению регулируемой величины от своего заданного значения. При значительном отклонении струйной трубки (до ограничителя) скорость перемещения регулирующего органа становится постоянной.

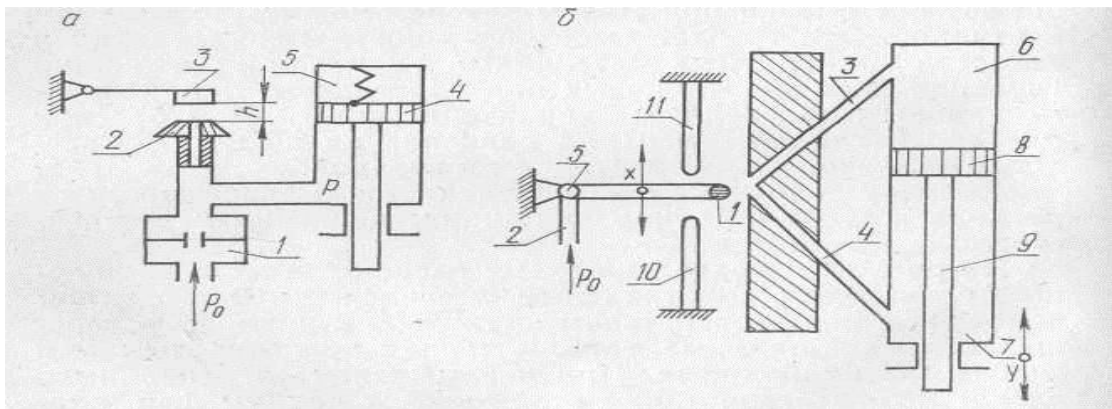


Рисунок 32 – Усилители типа сопло-заслонка и со струйной трубкой

Расход масла через струйную трубку составляет 300 - 500 л/ч. Максимальное отклонение конца струйной трубки в пределах, определяемых ограничителями 9, 10, составляет 1 - 2 мм. Коэффициент усиления гидроусилителей со струйной трубкой достигает  $10^4$ .

Гидроусилители изготавливаются без обратной связи и с жесткой обратной связью по положению поршня гидравлического исполнительного механизма.

Рассмотренные схемы гидроусилителей являются одно-каскадными, существуют и многокаскадные схемы, где исполнительный орган предыдущего усилителя воздействует на управляющий орган последнего. Выходная мощность гидроусилителей составляет 1 - 200 кВт.

2) **Магнитные усилители** относятся к параметрическим усилителям, принцип действия которых основан на использовании нелинейных

характеристик кривой намагничивания ферромагнитных материалов ( $\mu$  - магнитная проницаемость много больше 1). Они обладают высоким коэффициентом усиления по мощности и току, надежно работают при повышенной влажности, при вибрации, при высокой и низкой температурах, нечувствительны к качеству электрической энергии, простотой суммирования нескольких сигналов, высоким коэффициентом полезного действия.

Магнитный усилитель (рисунок 33а) представляет собой два одинаковых трансформатора с замкнутыми ферромагнитными сердечниками, которые подмагничиваются постоянным током. Вторичные обмотки трансформаторов включаются последовательно с нагрузкой  $R_H$  в сеть переменного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Первичные обмотки  $W_1$  называются управляющими и соединены последовательно и встречно, чтобы в них не индуцировался переменный ток.

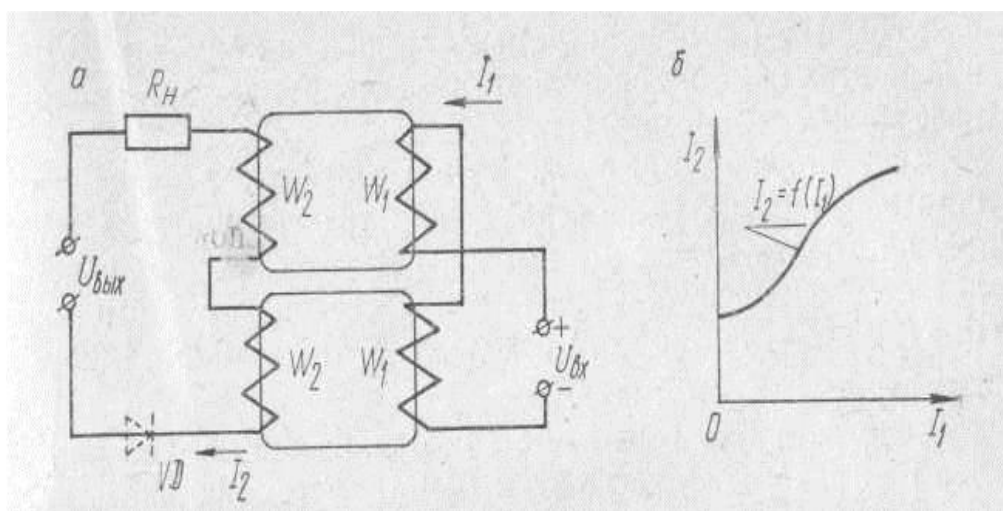


Рисунок 33 – Магнитный усилитель

Входной величиной усилителя является ток в обмотке  $W_1$ , выходной переменный ток в обмотках  $W_2$  и в нагрузочном сопротивлении  $R_H$ .

При увеличении постоянного тока насыщение сердечников увеличивается, а индуктивное сопротивление уменьшается, в результате чего сила тока в выходной цепи возрастает (рисунок 33б).

Коэффициент усиления по току:

$$k = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (102)$$

по мощности:

$$k = \frac{N}{N_n} \approx 50 \div 200, \quad (103)$$

где  $N$  - мощность на выходе;  $N_n$  - мощность на подмагничивание сердечников.

Как видим, затрачивая небольшую мощность на подмагничивание сердечника, можно управлять значительной мощностью на выходе.

Чтобы снизить наведенный переменный ток в управляющей обмотке (помимо встречного соединения обмоток  $W_1$ ), в цепь этих обмоток включают дроссель, резко снижающий наведенный переменный ток. Если вторичные обмотки  $W_2$  включить в сеть переменного напряжения, то по сердечникам трансформаторов будут проходить магнитные потоки, величина которых определяется намагничивающей силой вторичной обмотки:

$$\Phi = I_0^1 W_2, \quad (104)$$

где  $I_0^1$  - ток холостого хода, т.е. ток при разомкнутых первичных обмотках.

Если замкнуть первичные обмотки на какой-либо прибор или накоротко, то по этим обмоткам ток протекать не будет и, следовательно, не изменится величина тока во вторичных обмотках. Но если в первичные обмотки подать постоянный ток, то он вызовет уменьшение действующей магнитной проницаемости, так как увеличится напряженность магнитного поля. С уменьшением магнитной проницаемости будут уменьшаться индуктивность  $L$  вторичных обмоток и реактивное сопротивление этих обмоток, что приведет к увеличению тока во вторичных обмотках. Нагрузка  $R_n$  в цепи управляемой обмотки является выходом усилителя.

Магнитные усилители могут быть с обратной связью и без нее. Усилители без обратной связи применяются для усиления мощностей более 20 - 50 Вт. С увеличением мощности магнитного усилителя возрастает постоянная времени обмоток управления и, следовательно, уменьшается быстродействие.

Положительная обратная связь (т.е. когда магнитное поле обратной связи направлено согласно с магнитным полем обмотки управления  $W_1$ ) в магнитных усилителях применяется для получения более высоких коэффициентов усиления и для снижения инерционности. Эта связь может быть выполнена по току нагрузки либо напряжению (рисунок 34а).

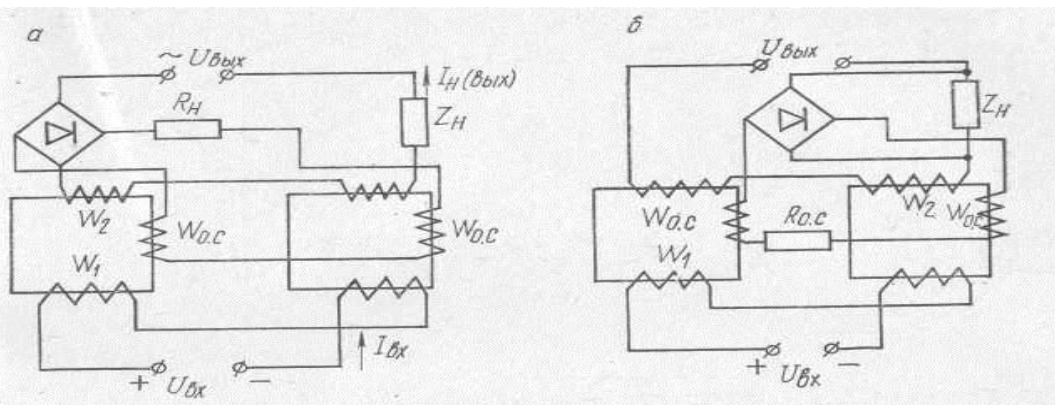


Рисунок 34 - Магнитные усилители с обратной связью

Принцип работы такой связи заключается в том, что действие тока нагрузки  $I_n$  или напряжения в обмотке обратной связи  $W_{oc}$  усиливает действие сигнала в обмотке управления  $W_l$ . Положительная обратная связь может быть внешней или внутренней.

Обратная связь в схеме (рисунке 34б) осуществляется путем подачи выпрямленного тока в обмотку  $W_{oc}$ , что соответствует обратной связи по току или последовательной обратной связи. На схемах рисунка 34 нагрузка обратной связи включена последовательно. Аналогично выполняется обратная связь с параллельной нагрузкой.

Внутренняя обратная связь осуществляется путем включения однополупериодных выпрямителей последовательно с обмотками переменного тока, что вызывает в цепи протекание однополупериодного (пульсирующего) выпрямленного тока, который и создает магнитное поле обратной связи, совпадающее с полем обмотки управления  $W_l$ .

Магнитные усилители несмотря на их инерционность в автоматике используются в качестве дросселей насыщения или управляемой индуктивности усилителей-преобразователей сигналов постоянного тока в переменный, магнитных модуляторов, усилителей мощности для управления двигателями переменного тока, бесконтактных магнитных реле, регуляторов напряжения, частоты и температуры.

3) **Электромашинным усилителем (ЭМУ)** называется усилитель, работа которого основана на эффекте усиления электрического сигнала в генераторах за счет механической энергии приводного двигателя. Он представляет собой машину постоянного тока, в которой механическая энергия приводного двигателя преобразуется в энергию выходного сигнала (электрического). ЭМУ нашли широкое применение в системах автоматического регулирования электроприводами (особенно в подъемно-транспортных машинах), в следящих электроприводах.

ЭМУ бывают с независимым возбуждением (независимые) (рисунок 35а) и с самовозбуждением с поперечным и продольным полем.

ЭМУ с независимым возбуждением состоит из электродвигателя  $D$  (обычно с короткозамкнутым ротором) и генератора постоянного тока  $G$ .

При подаче на обмотку статора генератора  $U_{ex}$  (управляющая обмотка) на нагрузку  $R_n$ , включенной в цепь обмотки ротора генератора, появится напряжение  $U_{вых}$  пропорциональное  $U_{ex}$ . Так как в обычном генераторе постоянного тока мощность возбуждения составляет 1 - 2% от его выходной мощности, то коэффициент усиления по мощности для него равен 50 - 100. При повышении числа оборотов вала приводного двигателя  $D$  коэффициент усилителя ЭМУ также растет. Для того чтобы статическая характеристика в рабочем диапазоне была линейна, магнитопровод генератора в этом диапазоне не должен насыщаться. Следовательно, генератор ЭМУ должен быть высокооборотным с характеристикой, не имеющей насыщения в рабочем диапазоне. В этом случае коэффициент усиления достигает величины 350 - 500. Для повышения коэффициента усиления практикуется каскадное включение

генераторов, когда один двигатель приводит во вращение два генератора, соединенные так, что первый генератор является возбудителем второго.

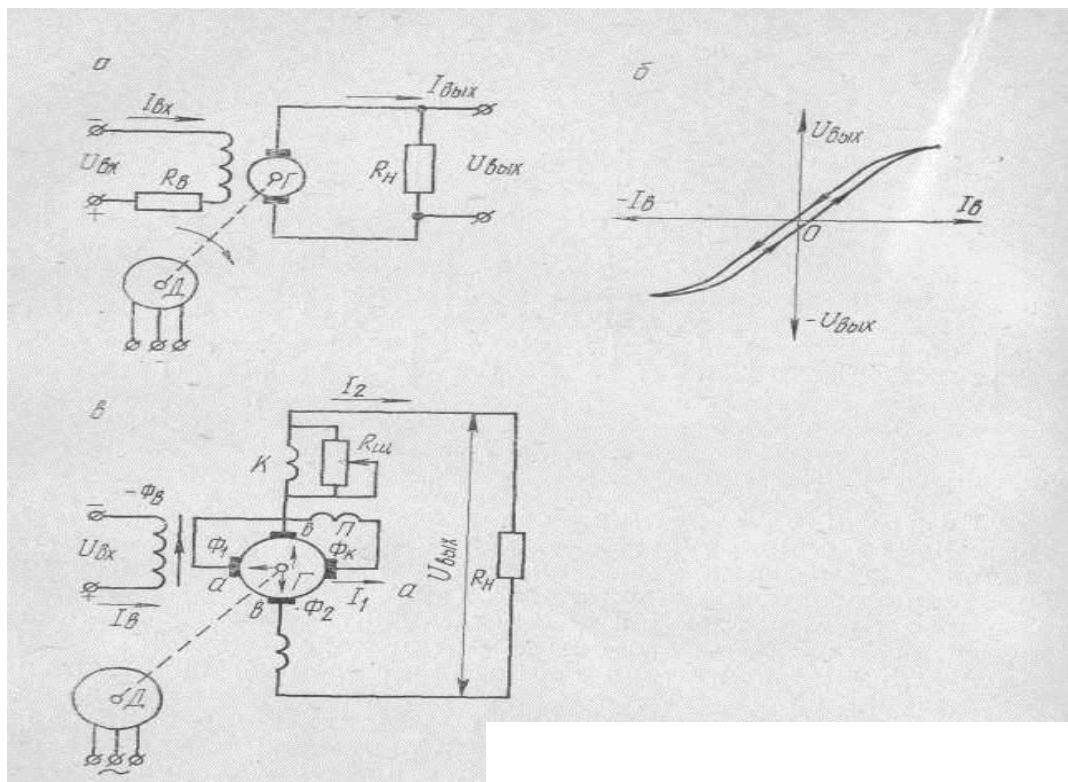


Рисунок 35 – Электромашинные усилители

Наибольший коэффициент усиления можно получить на ЭМУ с поперечным полем (рисунок 35в), т.е. генератор такого ЭМУ имеет четыре щетки. Работает такой ЭМУ следующим образом. При подаче небольшого по величине входного напряжения  $U_{вх}$  на обмотку возбуждения в генераторе создается небольшой продольный магнитный поток возбуждения  $\Phi_{в}$ , пронизывающий витки обмотки якоря, вращающегося с постоянной частотой от асинхронного двигателя. В результате этого в поперечной цепи якоря возникает ЭДС, снимаемая со щеток  $aa$ . Поперечная цепь якоря имеет малое сопротивление, поэтому по ней протекает значительный ток  $I_1$ , который вызывает магнитный поток  $\Phi_1$  значительно больший потока  $\Phi_{в}$ . Под действием магнитного потока  $\Phi_1$  в продольной цепи якоря индуцируется ЭДС, снимаемая щетками  $бб$ . Эта ЭДС вызывает появление тока  $I_2$ , под действием которого в якоре создается продольный магнитный поток реакции якоря  $\Phi_2$ . Магнитный поток  $\Phi_2$  во много раз больше потока возбуждения  $\Phi_{в}$ , и эти потоки направлены навстречу друг другу. Магнитный поток  $\Phi_2$  размагничивает генератор, т.е. он создает как бы эффект внутренней отрицательной обратной связи. Поэтому, чтобы не произошло полного размагничивания ЭМУ и потери эффекта усиления, на статоре располагают компенсационную обмотку  $K$ , которая включается в продольную цепь якоря последовательно с якорной обмоткой и нагрузкой  $R_n$  и образующей магнитный поток  $\Phi_k$ , компенсирующий поток  $\Phi_2$ .

Для изменения значения потока  $\Phi_k$  параллельно обмотке  $K$  включен переменный резистор  $R_{ин}$ . В ЭМУ с поперечным магнитным полем можно получить коэффициент усиления по мощности, равный  $10^3 - 10^5$ .

#### 4) Полупроводниковые усилители.

##### *Полупроводниковые усилители низкой частоты.*

Соответственно трем типам ламповых схем: с общей сеткой (рисунок 10.6а), общим катодом (рисунок 36б) и анодом (рисунок 36в) полупроводниковые триоды (транзисторы) могут быть включены по схеме с общей базой (рисунок 36г), общим эмиттером (рисунок 36д) и общим коллектором (рисунок 36е). Принципиальное отличие усилительного каскада на транзисторе от каскада на лампе заключается в том, что транзистор (кроме полевых) всегда работает при наличии входного тока, протекающего через базу, тогда как лампа может работать и без сеточных токов.

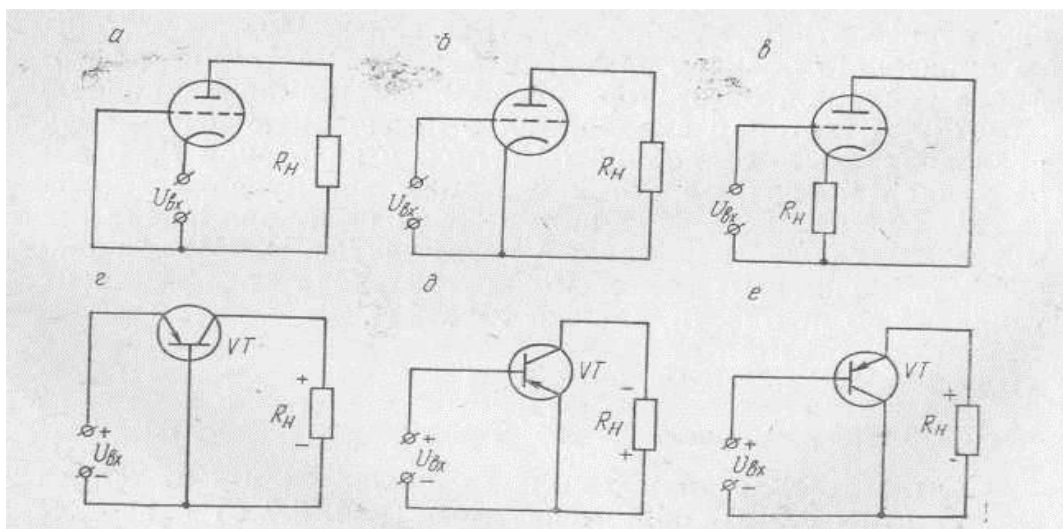


Рисунок 36 - Ламповые схемы

Рассмотрим работу усилителя напряжения низкой частоты на транзисторе, включенном по схеме с общей базой (рисунок 37а). В схеме усилительного каскада без источника смещения  $E_c$  при отсутствии входного сигнала (транзистор  $VT$  будет закрыт, так как по отношению к эмиттеру база р-р-транзистора будет иметь положительный потенциал. При подключении к входным клеммам источников синусоидального напряжения  $\sim U_{вх}$  на входе каскада появится выпрямленный ток, так как в этом режиме будут усиливаться только отрицательные полуволны входного напряжения (рисунок 37б, верхний график). Выходной ток в этой схеме всегда меньше входного, так как коэффициент усиления по току:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3} < 1, \tag{105}$$

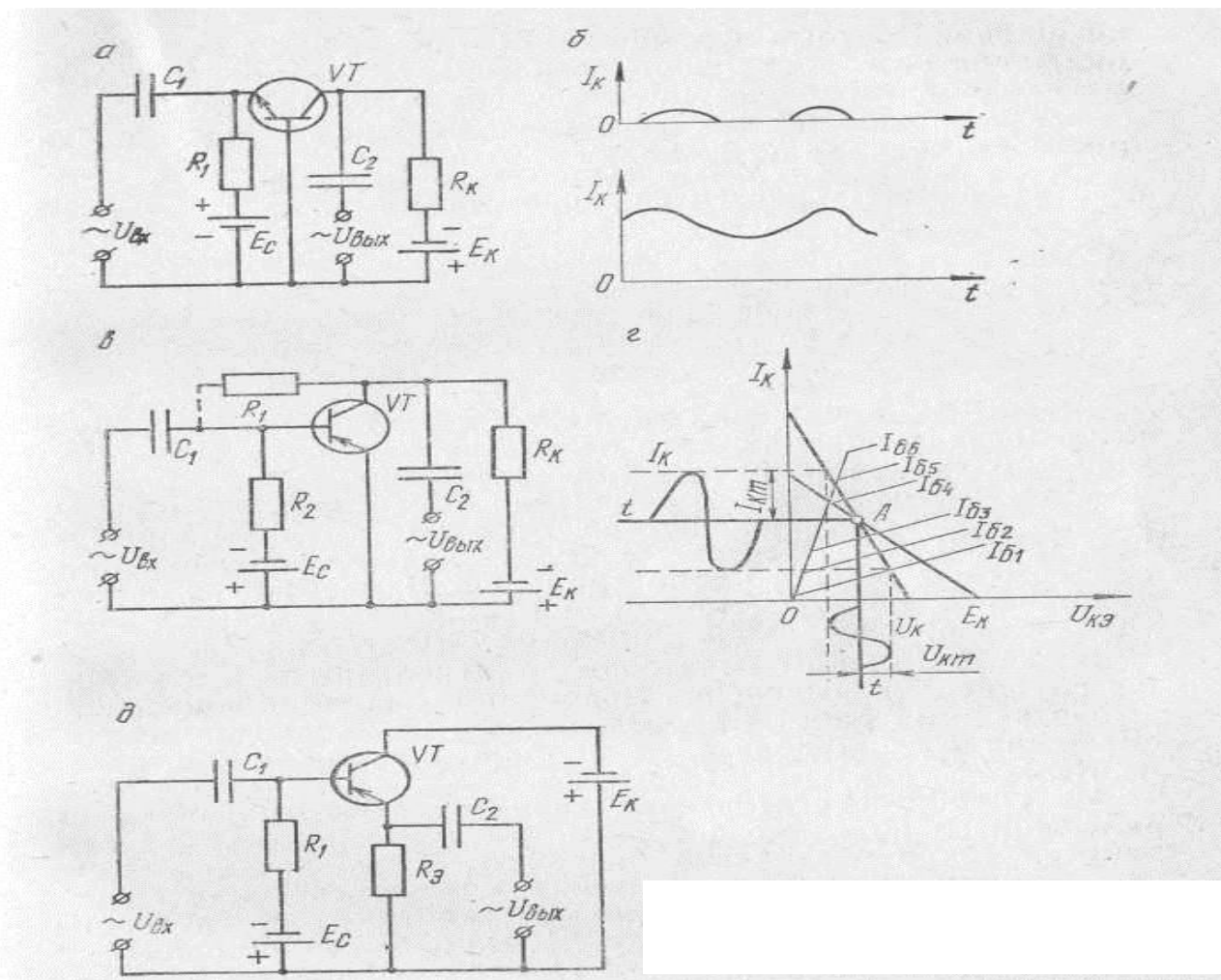


Рисунок 37 – Схемы включения многокаскадных усилителей

где  $\Delta I_k$  - приращение тока коллектора;  $\Delta I_e$  - приращение тока эмиттера.

Если между базой и эмиттером включить источник напряжения смещения  $E_c$ , то по коллекторной цепи потечет постоянный ток. При подведении к входным клеммам синусоидального сигнала коллекторный ток будет соответственно этому сигналу изменять свою величину в обе стороны от среднего значения (рисунок 37б, нижний график). Этот принцип работы транзисторного каскада соответствует режиму А. Установка рабочей точки и изменение режима работы каскада осуществляется изменением величины смещения  $E_c$ . Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  представляют собой практически короткое замыкание для переменного тока. Поэтому переменная составляющая падения напряжения на коллекторном резисторе  $R_k$  повторяет по форме входной сигнал. Мощность сигнала на нагрузке  $R_n$  (в схеме не показана) может в несколько раз превосходить мощность сигнала на входе.

Коэффициент усиления по мощности:

$$k_{p\delta} = \frac{P_{вых\delta}}{P_{вх\delta}} = \alpha^2 \frac{R_n}{R_{вх\delta}}, \quad (106)$$



Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_{u\sigma} = \frac{k_{p\sigma}}{\alpha} = \alpha \frac{R_{\mu}}{R_{\sigma\sigma}}, \quad (107)$$

Чтобы без искажения увеличить коэффициент усиления, последовательно включают несколько каскадов, связь между которыми выбирается трансформаторной.

Для многокаскадного усилителя более приемлемым является включение транзистора по схеме с общим эмиттером (рисунок 37в). Эта схема имеет лучшие соотношения входного и выходного сопротивлений. Входное переменное напряжение действует при этом между базой и эмиттером транзистора, а выходное снимается с резистора  $R_{\mu}^1$ .

В схеме с общим эмиттером конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  также служат для выделения переменной составляющей, а выбор режима работы производится с помощью источника смещения  $E_c$  или делителем напряжения на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ .

На семействе статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рисунок 37г), рабочая точка обозначена буквой  $A$ . Через нее проходят две линии нагрузки: статическая, соответствующая величине сопротивления  $R_k$ , и динамическая, соответствующая нагрузке по переменному току  $R'_{\mu}$ . Во избежание нелинейных искажений рабочая точка ( $I_k$ ,  $U_k$ ) выбирается исходя из заданной максимальной величины сигнала  $I_{km}$ ,  $U_{km}$ .  
 $I_k \geq I_{km}$ ,  $U_k \geq U_{km}$

Ток  $I_1$  через делитель напряжения выбирается в пределах (0,2-0,5)  $I_k$ , но не менее чем удвоенный ток базы при отсутствии входного сигнала. Отсюда:

$$R_1 + R_2 = \frac{E_k}{I_1}. \quad (108)$$

В схемах с общей базой и общим эмиттером коллекторный резистор выбирается из соотношения:

$$R_k = \frac{E_k - U_k}{I_k}. \quad (109)$$

При выборе режима работы нагрузочные характеристики не должны пересекать линии предельно допустимой мощности.

В схеме с общим коллектором (рисунок 37д), называемой также эмиттерным повторителем, коэффициент усиления по напряжению всегда меньше единицы, но эта схема имеет высокое входное сопротивление.

Коэффициент усиления по току:

$$k_k = \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1. \quad (110)$$

Выходное сопротивление каскада мало, поэтому его удобно использовать в качестве согласующего элемента.

Из сопоставления характеристик усилителей видно, что наибольшее значение коэффициента усиления по току имеет место в схеме включения с общим коллектором (десятки и сотни единиц), а наибольшее усиление по мощности (на низких частотах) обеспечивается в схеме включения с общим эмиттером.

Коэффициент усиления по напряжению для схем включения с общей базой и общим эмиттером примерно одинаков, а для схем включения с общим коллектором меньше единицы.

**Усилителем постоянного тока** (УПТ) называют устройство, предназначенное для усиления медленно изменяющихся электрических колебаний, в том числе постоянных входных сигналов (нулевой частоты), с сохранением формы кривой усиливаемого сигнала.

Различают две разновидности УПТ: с непосредственным усилением сигнала постоянного тока и с предварительным преобразованием (модуляцией) сигнала постоянного тока в переменный ток, его усиления и последующей демодуляцией.

В усилителях первого типа применяется гальваническая (реостатная) связь между каскадами, а также между источником сигнала и нагрузкой. Связь между каскадами таких усилителей осуществляется при помощи отдельных источников постоянного тока (батарей связи) или делителей напряжения.

На рисунке 38а приведена принципиальная схема двухкаскадного УПТ, у которого межкаскадная связь выполнена с помощью делителя напряжения на резисторах  $R_3, R_4$ , который одновременно является источником смещения, задающим режим работы транзисторов.

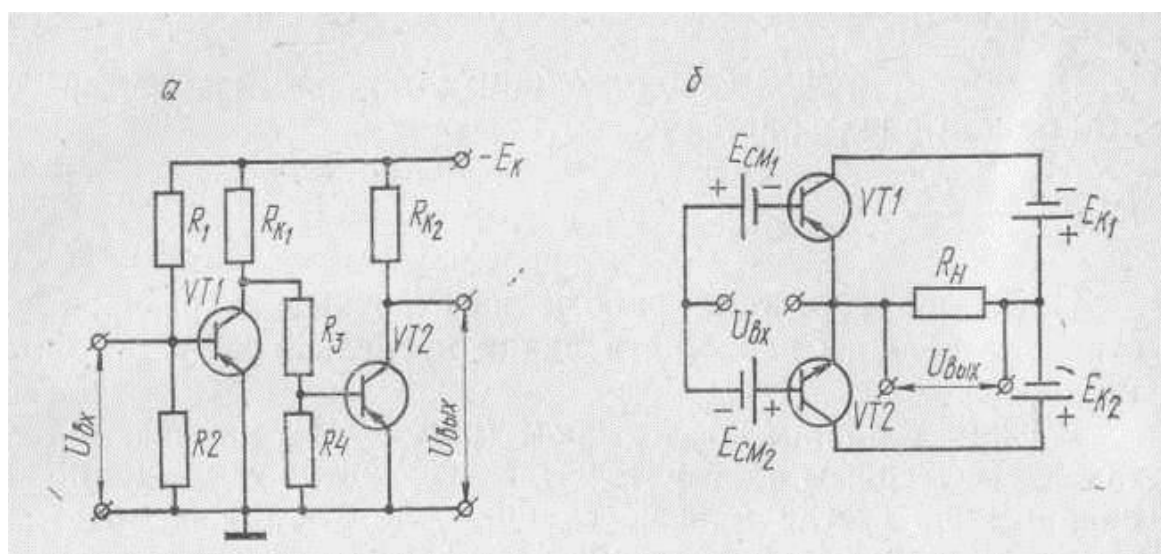


Рисунок 38 – Усилители постоянного тока

В реверсивной схеме, приведенной на рисунке 38б, использованы транзисторы с *p-n-p* и *n-p-n*-проводимостью. При этом за счет удвоения числа источников питания из схемы исключены входные и коллекторные резисторы.

Напряжение входного сигнала поступает на транзисторы *VT1* и *VT2* (рисунок 38б) в одной и той же фазе. При этом коллекторный ток одного транзистора увеличивается, а другого - уменьшается. Токи  $I_{k1}$  и  $I_{k2}$  протекают по нагрузке  $R_n$  в противоположных направлениях, причем постоянные составляющие этих токов, создаваемые источниками смещения  $E_{см1}$  и  $E_{см2}$ , взаимно компенсируются.

В УПТ с реостатной связью всякое изменение напряжения питающих батарей, изменение параметров транзисторов или сопротивлений в схеме приводит к изменению сигналов на выходе, которое невозможно отличить от изменений выходного сигнала, вызванных полезным сигналом на входе. Такие изменения напряжения на выходе, отнесенные ко входу, при постоянном входном сигнале называют дрейфом нуля усилителя. Дрейф нуля определяет величину наименьшего входного сигнала, при котором может работать усилитель, и является одним из существенных недостатков УПТ. В УПТ на транзисторах, если не принять специальных мер температурной стабилизации, изменение выходного тока может достигать  $\pm 100\%$  при изменении температуры на  $\pm 20$  °С.

Поэтому в УПТ, предназначенных для усиления входных сигналов низкого уровня, применяют предварительную модуляцию входного сигнала с постоянной частотой. Это дает возможность использовать обычные **усилители переменного** тока с реостатно-емкостной или трансформаторной связью, в которых изменение параметров транзисторов, источников питания и других элементов схемы приводит только к изменению коэффициента усиления, но не вызывает дрейфа нуля.

Модулятор преобразует низкочастотный сигнал в сигнал более высокой частоты. На первый вход модулятора подается входное напряжение определенной полярности, а на второй - переменное опорное напряжение, а с выхода снимается переменное напряжение, фаза которого в зависимости от полярности входного сигнала может быть сдвинута на  $180^\circ$ . Демодулятор производит обратное преобразование.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какие устройства называются усилителями? Для чего они предназначены?
2. Конструкция и принцип действия гидравлических и пневматических усилителей.
3. Конструкция и принцип действия магнитных усилителей.
4. Конструкция и принцип действия электромашинных усилителей.
5. Конструкция и принцип действия полупроводниковых усилителей.

## 10 Исполнительные устройства

### **План:**

1. Классификация исполнительных устройств.

2. Конструкция и принцип действия исполнительных устройств различного типа.

1. Исполнительным механизмом (ИМ) называется устройство автоматики, воздействующее непосредственно или через согласующие элементы на регулирующий орган управляемого объекта. ИМ как часть системы автоматического регулирования предназначен для отработки управляющего сигнала, формируемого управляющими элементами автоматики таким образом, чтобы отклонение регулируемой величины от заданного значения становилось как можно меньше.

К ИМ предъявляют ряд требований, а именно:

- способность развивать необходимое перестановочное усилие или момент, достаточные для перестановки регулирующего органа объекта;
- обеспечивать перестановку регулирующего органа на требуемую величину;
- обеспечивать требуемую скорость и ускорение перемещения регулирующего органа;
- иметь высокие технико-экономические показатели (надежность, стоимость и др.).

Исполнительные механизмы классифицируют по основным признакам: виду энергии, характеру движения выходного органа, виду используемого двигателя и др.

В зависимости от вида энергии, используемой для питания двигателя, исполнительные механизмы делятся на: электрические, пневматические и гидравлические. По виду движения выходного органа исполнительные механизмы подразделяются на: поворотные и прямоходовые. Поворотные исполнительные механизмы бывают однооборотные и многооборотные. В зависимости от типа двигателя исполнительные механизмы делятся на: электродвигательные, электромагнитные, поршневые и мембранные. В зависимости от скорости движения выходного органа различают исполнительные механизмы с постоянной скоростью и исполнительные механизмы, у которых скорость перемещения выходного органа пропорциональна входному сигналу.

В сельскохозяйственном производстве для автоматизации стационарных машин и процессов применяют преимущественно электрические ИМ, а на мобильных машинах – гидравлические ИМ.

Основные характеристики ИМ следующие:

- крутящий момент на выходном валу ( $H \cdot m$ ) для поворотных ИМ и усилие на штоке ( $H$ ) для прямоходовых;
- угол поворота вала для однооборотных или число оборотов вала для многооборотных;
- время полного хода выходного органа от одного крайнего положения к другому.

На работу всей системы автоматического регулирования оказывают влияние такие характеристики, как выбег ИМ, люфт и гистерезис.

Под *выбегом* понимают перемещение выходного органа ИМ после выключения механизма, работавшего в установившемся режиме. Движущиеся массы работающего ИМ приобретают кинетическую энергию, которая гасится на пути выбега. Выбег влияет на точность и устойчивость САР. Поэтому величина выбега не должна превышать 0,25-1% полного хода выходного органа.

Люфтом ИМ называется свободный ход выходного органа при отсутствии управляющего сигнала. Люфт возникает из-за зазоров в рабочих частях ИМ и износа их контактных поверхностей. Люфт влияет на положение границы устойчивости САР и может быть причиной возникновения в САР автоколебаний. В зависимости от типа ИМ величина люфта ограничивается следующими значениями: 0,2-0,5 мм для прямоходовых; 0,75-1° для однооборотных; до 3° для многооборотных.

Гистерезис (в переводе с греческого языка - опаздывание, отставание) между положением выходного органа и сигналом ИП положения не должен быть более 1,5%.

По своим динамическим свойствам ИМ - интегрирующее звено. Для преобразования ИМ в пропорциональное звено, в котором положение выходного органа пропорционально входному сигналу, ИМ охватывают местной жесткой обратной связью.

2. **Электрические ИМ** делятся на две группы: электродвигательные и электромагнитные. В сельскохозяйственном производстве применяются преимущественно ИМ с электродвигателями переменного тока. Они относятся к ИМ с постоянной скоростью.

*Электродвигательный* ИМ состоит из электродвигателя, редуктора, тормоза и контрольно-пусковой аппаратуры (конечных выключателей, ИП положения выходного органа и т. п.).

В ИМ малой мощности используются двухфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым или полым тонкостенным ротором. Электродвигатель имеет две обмотки статора: одна обмотка управляющая, вторая возбуждающая. Для изменения направления вращения необходимо изменить фазу напряжения в управляющей обмотке.

В мощных ИМ применяется трехфазный электродвигатель. В некоторых ИМ применяются электродвигатели с низкой частотой вращения ротора - (например двигатели с электромагнитной редукцией), имеющие частоту вращения до 60 об/мин. В этих ИМ отсутствует тормоз, так как время пуска и остановка их электродвигателей незначительно.

Маркировка электродвигательных исполнительных механизмов имеет следующее обозначение (рисунок 39). Пример маркировки: МЭО-6,3/25-0,25.

Электромагнитные ИМ обеспечивают преобразование электрического сигнала в двухпозиционное перемещение регулирующего органа. Их применяют для двухпозиционного регулирования. Они отличаются большим

быстродействием, простой конструкцией и высокой надежностью. Конструктивно электромагнитные ИМ выполняют совместно с регулирующим органом. Для управления потоком жидкости или газа применяют соленоидные клапаны типов СВ, СВВ и др.

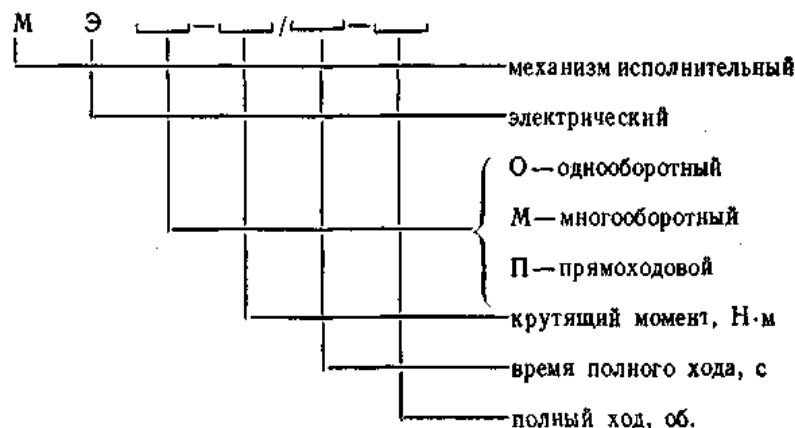


Рисунок 39 – Обозначение электродвигательных ИМ

В электрических цепях для управления применяют магнитные пускатели и контакторы.

Электромагнит ИМ представляет собой катушку, внутри которой находится подвижный якорь. При подаче напряжения в катушку якорь *Я* перемещается под действием электромагнитной силы и перемещает связанный с ним регулирующий орган *К* (рисунок 40).

**Пневматические и гидравлические ИМ** имеют одинаковый принцип действия, основанный на перемещении выходного органа под действием давления газа или жидкости.

**Пневматические исполнительные механизмы (ПИМ)** воспринимают энергию сжатого воздуха и преобразуют ее в перестановочное усилие выходного штока. Они отличаются простотой, высокой надежностью, малой стоимостью и низкими эксплуатационными расходами.

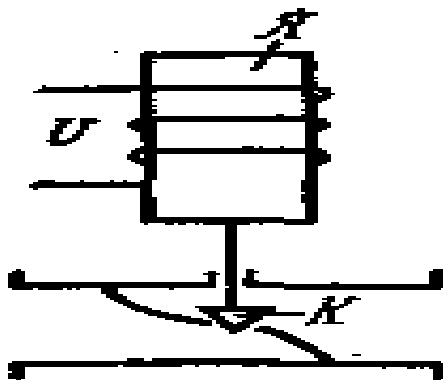


Рисунок 40 - Электромагнитный ИМ

В зависимости от вида рабочего органа ПИМ делятся на мембранные, поршневые, сильфонные, лопастные. В зависимости от способа возврата штока в исходное состояние ПИМ бывают пружинные и беспружинные.

Схемы основных типов ПИМ показаны на рисунке 41. В пружинных ПИМ перестановочное усилие в одном направлении создается за счет действия сжатого воздуха, а в противоположном направлении - силой упругости пружины. В беспружинных ПИМ перестановочное усилие в обоих направлениях создается за счет действия сжатого воздуха.

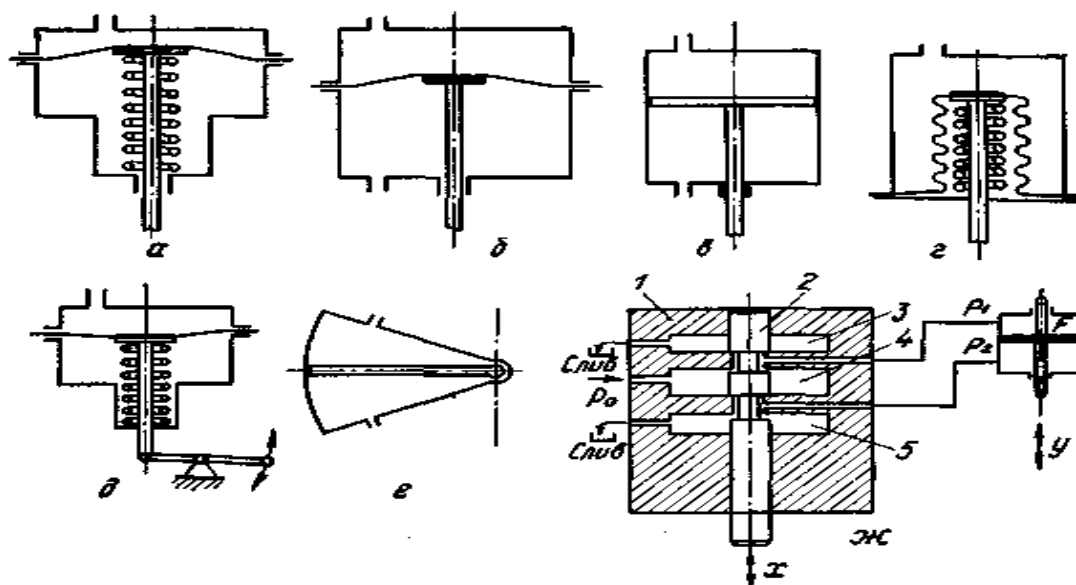


Рисунок 41 - Схемы пневматических и гидравлических исполнительных механизмов: а - мембранный с пружиной; б - мембранный без пружины; в - поршневой; г - сильфонный; д - мембранный поворотный; е - лопастный; ж - гидравлический ИМ с золотником

Поворотные движения рабочего органа (вала) в ПИМ создаются путем механического преобразования поступательного движения штока в угловое (рисунок 41д). Применяются также лопастные ПИМ (рисунок 41е).

Наибольшее распространение получили мембранные ПИМ. Они развивают перестановочное усилие до 40 кН и обеспечивают перемещение выходного органа от 4 до 100 мм.

Для управления регулирующими органами, требующими перемещения штока до 400 мм, используют поршневые ПИМ. Основные элементы поршневого ПИМ - цилиндр и поршень с деталями уплотнения. Поршневые ПИМ развивают перестановочное усилие до 100 кН.

Сильфонные ПИМ применяют при малых (от 1 до 6 мм) перемещениях регулирующего органа.

В лопастных ПИМ первичным силовым элементом является лопасть, помещенная в камеру квадратного сечения. Лопасти имеют угол поворота 60 и

90° и применяются преимущественно в системах двухпозиционного регулирования.

Гидравлические исполнительные механизмы (ГИМ), использующие в качестве рабочего тела жидкость, имеют ряд преимуществ:

- высокое быстродействие (скорость перемещения выходного органа более 100 мм/с);
- большие перестановочные усилия (от 2,4 до 130 кН);
- малые габариты;
- малую массу, приходящуюся на единицу усилия (от 0,006 до 0,5 кг массы на 10 Н силы);
- отсутствие люфтов;
- бесступенчатое регулирование скорости движения;
- допускают большие кратковременные перегрузки. Наибольшее распространение получили поршневые ГИМ.

Управление ПИМ и ГИМ осуществляется преимущественно при помощи золотниковых устройств.

Золотниковое устройство состоит из цилиндрического золотника 1 (рисунок 41ж), который смещается в корпусе 2 на величину  $x$ . При этом изменяются проходные площади дросселирующих щелей 3, 4, 5, что приводит к потере давления жидкости, проходящей через регулируемые щели. Скорость перемещения выходного штока поршня пропорциональна площади поршня и зависит от смещения золотника и перепада давления на поршне. Поскольку активная площадь поршня постоянна, то перепад давления пропорционален усилию на штоке. Поток через щель при поступлении рабочей жидкости из линии питания в гидроцилиндр равен потоку при выходе из гидроцилиндра на слив. Зависимость скорости перемещения рабочего органа от смещения золотника при фиксированном перепаде давления называется статической скоростной характеристикой исполнительного механизма.

У поршневых ИМ скорость перемещения рабочего органа пропорциональна входной величине. Исполнительные гидравлические поршневые механизмы типа МГП предназначены для управления рабочими органами систем автоматического регулирования.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какие устройства называются исполнительными? Для чего они предназначены?
2. Классифицируйте ИМ.
3. Конструкция и принцип действия электродвигательных ИМ.
4. Конструкция и принцип действия электромагнитных ИМ.
5. Конструкция и принцип действия гидравлических и пневматических ИМ.

#### 11 Реле автоматики

##### **План:**

1. Классификация.



2. Основные характеристики реле.
3. Требования, предъявляемые к реле.

1. **Реле** - электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющей (входной) величины происходит скачкообразное изменение управляемой (выходной) величины. Из двух величин хотя бы одна должна быть электрической. По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода и для защиты энергосистем.

По принципу действия реле делятся на: электромагнитные, поляризованные, индукционные, магнитоэлектрические, полупроводниковые и др.

В зависимости от входного параметра реле можно разделить на реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин. Следует отметить, что реле может реагировать не только на значение величины, но и на разность значений (дифференциальные), на изменение знака или на скорость изменения входной величины. Иногда реле, имеющие только одну входную величину, должно воздействовать на несколько независимых цепей. В этом случае реле воздействует на другое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется и тогда, когда мощность, которой может управлять основное реле, недостаточна.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на: контактные и бесконтактные.

Первые воздействуют на выходной параметр путем замыкания или размыкания контактов в управляемой цепи; во-вторых, при срабатывании реле резко меняется сопротивление, включенное в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактной системы соответствует большое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле. Это состояние бесконтактного реле носит название закрытого состояния.

Замкнутому состоянию контактного исполнительного органа соответствует малое сопротивление между выходными зажимами бесконтактного реле. При этом говорят об открытом состоянии бесконтактного реле.

Помимо указанных признаков, реле различаются способом включения. Первичные реле включаются в контролируемую цепь непосредственно, а вторичные - через измерительные трансформаторы.

## 2. Основные характеристики реле.

Рассмотрим зависимость выходного параметра от значения воздействующей величины для случая реле с замыкающим контактом. У этих реле при отсутствии входного сигнала контакты исполнительного органа разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление, введенное в управляемую цепь, не равно бесконечности и ток имеет минимальное значение  $u_{\text{мин}}$ . На рисунке 42 по оси абсцисс отложено значение воздействующей величины, а по оси ординат - выходной. Значение

воздействующей величины, при которой происходит срабатывание реле, называется значением величины срабатывания. До тех пор, пока  $x < x_{cp}$ , выходной параметр  $y$  либо равен нулю, либо равен своему минимальному значению  $y_{мин}$  (для бесконтактных аппаратов). При  $x \geq x_{cp}$  выходной параметр скачком меняется от  $y_{мин}$  до  $y_{макс}$ . Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение воздействующей величины, то при  $x \leq x_{отп}$  происходит отпускание реле.

Значение воздействующей величины, при котором произошло скачкообразное уменьшение выходного параметра с  $y_{макс}$  до  $y_{мин}$ , называется значением величины отпускания. Заданное значение величины (срабатывания или отпускания), на которую отрегулирован аппарат, называется установкой по воздействующей величине.

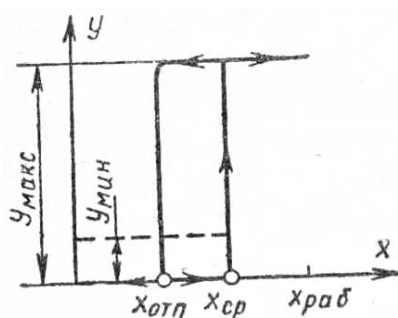


Рисунок 42 - Характеристика управления реле

Время с момента подачи команды на срабатывание до момента скачкообразного изменения выходной величины называется временем включения. Это время зависит от конструкции реле и величины входного параметра. Чем больше значение воздействующей величины по сравнению с  $x_{cp}$ , тем быстрее и надежнее работает реле. Отношение  $x_{раб}/x_{cp}$  называется коэффициентом запаса.

Для целого ряда реле очень важным является отношение  $x_{отп}/x_{cp}$ . Это отношение называется коэффициентом возврата.

Время с момента подачи команды на отключение до момента достижения минимального значения выходной величиной называется временем отключения. Для контактных аппаратов это время состоит из двух интервалов времени отпускания и времени дуги. Наглядное представление о времени работы электромагнитного реле дает рисунок 43. На рисунке 43а дана зависимость тока от времени в управляемой цепи, а на рисунке 43б - в управляющей цепи (обмотке реле).

Весьма важным параметром, характеризующим усилительные свойства реле, является отношение  $P_y/P_{cp}$ , где  $P_y$  - максимальная мощность в нагрузке управляемой цепи, а  $P_{cp}$  - минимальная мощность входного сигнала, при котором происходит срабатывание реле.

Для реле с исполнительным органом в виде контактной системы максимальная мощность управления  $P_y$ , определяется не длительным током,

который может пропустить контакт, а ток, который может быть многократно отключен.

Требования к реле в значительной мере определяются их назначением. К реле защиты энергосистем предъявляются следующие четыре основные требования: *селективность, быстрота действия (быстродействие), чувствительность, надежность.*

Под *селективностью* понимается способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы. *Быстрота* действия позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии. Повышение *чувствительности* реле позволяет уменьшать «мертвую» незащищенную зону.

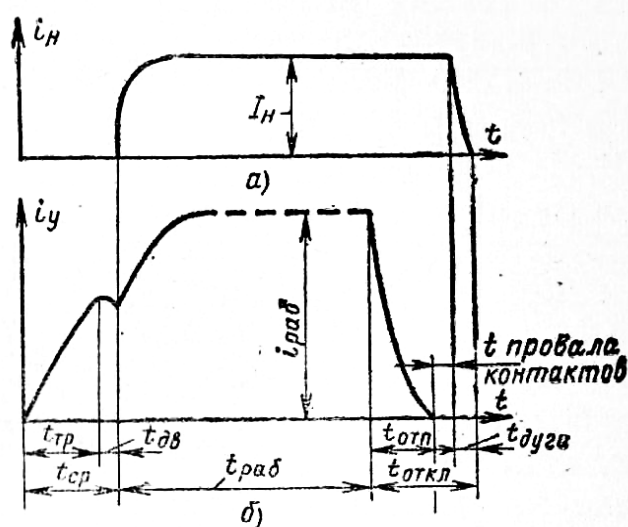


Рисунок 43 - Зависимость от времени выходной и входной величин для электромагнитного реле

Реле для защиты должны иметь высокую *надежность*, так как неправильная работа реле может привести к развитию тяжелых аварий и недоотпуску большого количества энергии.

В отношении внешних условий реле защиты работают в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, работают в помещениях, лишенных пыли и газов, вызывающих коррозию. Если учесть, что аварийные режимы в системе редки, реле работают в относительно легких условиях. Поэтому к реле не предъявляются высокие требования в отношении износостойкости.

Реле, предназначенные для схем защиты и автоматики электропривода, должны удовлетворять специфическим требованиям. Эти реле работают при худших условиях: возможны удары, вибрация. Воздух часто засорен пылью или вредными производственными примесями. Так как современные схемы электропривода имеют число включений в час до 1000 - 1200, реле управления должны иметь высокую механическую и электрическую износостойкость

порядка  $(1-10) \cdot 10^6$  циклов «включение - отключение». Надежность работы схем автоматики зависит от надежности работы отдельных элементов.

Так как реле управления и защиты электродвигателей много и им приходится выполнять большое число операций, то они должны иметь высокую надежность.

### **Контрольные вопросы:**

1. Для чего служит реле?
2. Назовите основные характеристики реле.
3. Какие требования предъявляют к реле? Чем обуславливаются эти требования?

## 12 Логические элементы

### **План:**

1. Понятие логического элемента.
2. Различные типы логических элементов.

1. Логическим элементом называется устройство, реализующее простую логическую операцию с сигналами. Под логической операцией понимают связь между сигналами, которые могут принимать только два значения, одно из которых обозначается как «1» (логическая единица), а другое - «0» (логический ноль).

Сигналы, принимающие только одно из двух названных выше значений, называются логическими переменными.

Источником логических переменных может быть любая физическая система, имеющая два устойчивых состояния (например, замкнутые контакты - разомкнутые контакты, есть напряжение - нет напряжения и т. д.). Одному из состояний приписывается состояние «1», а другому - «0».

Логические элементы служат основой построения более сложных логических схем для решения таких логических задач в устройствах и системах автоматики, как сигнализация, блокировка, защита, управление и т. д.

Входные переменные принято обозначать буквой  $x$  ( $x_1, x_2, \dots$ ), а выходные - буквой  $y$ . Функциональная связь между выходными и входными логическими переменными называется логической функцией  $y = \varphi(x_1, x_2, \dots)$ .

К простейшим логическим операциям (или функциям) относятся логическое отрицание (инверсия), логические сложения и логические умножения. Эти операции имеют сокращенные названия: соответственно НЕ, ИЛИ, И. В алгебраической форме логические функции записываются в следующем виде:

$$\text{функция НЕ: } y = \bar{x} \quad (111)$$

$$\text{функция ИЛИ: } y = x_1 \vee x_2 \vee \dots \quad (112)$$

функция И:  $y = x_1 \wedge x_1 \wedge \dots$  (113)

Кроме алгебраической записи логических функций, логические операции представляют в виде таблиц, которые называются таблицами истинности. В таблице устанавливается соответствие значений выходной переменной определенным значениям входных переменных. Обозначения логических операций приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Условные обозначения простейших логических операций

Операция	Алгебраическая формула	Таблицы истинности	Обозначение															
НЕ (инверсия)	$y = \bar{x}$	<table border="1"> <tr><td><math>x</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x$	$y$	0	1	1	0										
$x$	$y$																	
0	1																	
1	0																	
ИЛИ (дизъюнкция)	$y = x_1 \vee x_2$ или $(y = x_1 + x_2)$	<table border="1"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
И (конъюнкция)	$y = x_1 \wedge x_2$ или $(y = x_1 x_2)$	<table border="1"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
$x_1$	$x_2$	$y$																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

2. По физическим принципам логические элементы подразделяются на электромеханические (реле), электронные (полупроводниковые), пневматические и др.

Каждой логической операции соответствует определенная электрическая схема или состояние неэлектрического логического элемента (например, пневматического реле).

Входными и выходными сигналами электрических и электронных логических элементов, как правило, является электрическое напряжение, а пневматических - давление воздуха.

Электромеханические реле выполняют логические операции в электрических схемах, так как их контакты могут находиться в двух состояниях (замкнутые, разомкнутые). Входными сигналами реле являются напряжения, подаваемые на катушки реле, а выходными - напряжения в цепи, создаваемой контактами реле.

Полупроводниковые логические элементы имеют ряд преимуществ перед релейными: высокое быстродействие, малый габарит, высокая надежность и др. Их выполняют на диодах, транзисторах или их комбинациях.

Пневматические логические элементы выполнены на базе трехмембранного пневматического реле. Трехмембранное реле (рисунок 44) состоит из четырех камер (А, Б, В, Г), разделенных гибкими мембранами 1, 2, 3. Мембраны соединены металлическим штоком. Верхние и нижние концы служат заслонками питающего и сбросного сопл. Шток вместе с жесткими центрами мембран представляет собой жесткую мембранную сборку, которая может перемещаться в вертикальном направлении в зависимости от соотношения сил, создаваемых давлением воздуха в камерах на соответствующие мембраны. При нарушении равновесия сил мембранная сборка перемещается вверх или вниз, открывает одно из сопл и закрывает другое. Если закрывается сбросное сопло и открывается питающее сопло, то давление на выходе примерно равно давлению питания. При обратном перемещении мембранной сборки давление на выходе уменьшается. Пневматические сигналы подводятся через входные штуцера в камерах Б и В. Если в одной из камер создать предварительно избыточное давление, то пневматические реле выполняют логические операции.

Логические элементы характеризуются следующими основными параметрами: номинальными значениями входных и выходных сигналов, соответствующих логической единице («1») и логическому нулю («0»), потребляемой мощностью, быстродействием и др. Номинальные значения входных сигналов - значения сигналов, соответствующих логической «1» и логическому «0», при которых логический элемент переходит из одного устойчивого состояния в другое.

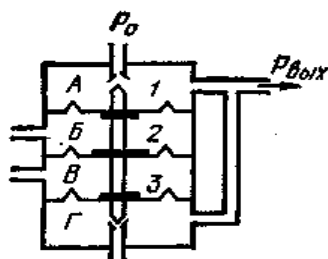


Рисунок 44 - Трехмембранное реле

Схемы выполнения простых логических операций различными элементами приведены в таблице 9.

Потребляемая мощность определяется как средняя мощность, отбираемая логическим элементом от источника питания в двух крайних состояниях, соответствующих логическому «0» и логической «1». Быстродействие логического элемента определяется временем переключения из одного состояния в другое:  $t^{01}$  - время переключения из «0» в «1»  $t^{10}$  - время переключения из «1» в «0». Логические операции и логические соотношения изучает математическая логика, основы которой были заложены английским математиком Дж. Булем (1854).

Таблица 9 - Схемы логических элементов

Операция	Логические элементы		
	электромеханические	полупроводниковые	пневматические
НЕ			
ИЛИ			
И			

Основные законы логики:  
сочетательный

$$\left. \begin{aligned} (x_1 \vee x_2) \vee x_3 &= x_1 \vee (x_2 \vee x_3) \\ \text{и} \\ (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3 &= x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3); \end{aligned} \right\} \quad (114)$$

переместительный

$$\left. \begin{aligned} x_1 \vee x_2 \vee x_3 &= x_2 \vee x_3 \vee x_1 \\ \text{и} \\ x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 &= x_3 \wedge x_2 \wedge x_1; \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

распределительный

$$\left. \begin{aligned} (x_1 \vee x_2) \wedge x_3 &= x_1 \wedge x_3 \vee x_2 \wedge x_3 \\ \text{и} \\ x_1 \wedge x_2 \vee x_3 &= (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3); \end{aligned} \right\} \quad (116)$$

инверсия

$$\begin{aligned} \overline{x_1 \vee x_2} &= \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \\ \text{и} \\ \overline{x_1 \wedge x_2} &= \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2. \end{aligned} \tag{117}$$

Следствия законов алгебры логики:

$$\left. \begin{array}{ll} 1) x \vee 0 = x; & 2) x \wedge 0 = 0; \\ 3) x \vee 1 = 1; & 4) x \wedge 1 = x; \\ 5) x \vee x = x; & 6) x \wedge x = x; \\ 7) x \vee \bar{x} = 1; & 8) x \wedge \bar{x} = 0; \\ 9) x_1 \vee (x_1 \wedge x_2) = x_1; & 10) x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) = x_1; \\ 11) x_1 \vee (x_1 \wedge x_2) = x_1 \vee x_2; & 12) x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) = x_1 \wedge x_2. \end{array} \right\} \tag{118}$$

Следствия законов алгебры логики используются для минимизации логических функций сложной системы с целью ее упрощения.

#### Контрольные вопросы:

1. Какие устройства называются логическими?
2. Дайте определение логического нуля и логической единицы.
3. Какие системы могут служить источниками логической информации?
4. Какие функции выполняют логические элементы И, НЕ, ИЛИ? Как они обозначаются?
5. Для чего используются законы алгебры логики? Какие Вы знаете законы алгебры логики?

### 13 Регуляторы

#### План:

1. Классификация регуляторов.
2. Конструкция и принцип действия регуляторов.

1. Автоматическое управляющее устройство, работающее по замкнутому циклу и предназначенное для стабилизации какого-либо параметра, называется **регулятором**.

Автоматический регулятор представляет собой совокупность устройств, присоединенных к управляемому объекту для регулирования его выходной величины. К выходу объекта присоединяется измерительный элемент, контролирующий выходную величину, а к регулирующему органу объекта исполнительный элемент. При отклонении регулируемого параметра объекта от заданного значения регулятор в соответствии с заложенным в него законом формирует управляющее воздействие на регулирующий орган, чтобы уменьшить отклонение.



Регуляторы классифицируют по следующим признакам: по виду регулируемого параметра, по виду регулирующего воздействия, по роду энергии, по конструктивному выполнению, по закону регулирования.

По *виду регулируемого параметра* регуляторы делятся на регуляторы температуры, давления, уровня, частоты вращения, напряжения, мощности и др.

По *виду регулирующего воздействия* регуляторы подразделяются на регуляторы прямого действия, у которых энергия для перемещения регулирующего органа развивается в результате изменения регулируемого параметра, и регуляторы непрямого действия, использующие энергию постороннего источника.

По *роду энергии* регуляторы подразделяются на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные.

Конструктивно только простейшие регуляторы прямого действия могут представлять единое изделие, включающее измерительный и исполнительный элемент, объединенный с регулирующим органом.

В большинстве случаев под регулятором понимают устройство, принимающее сигнал от первичного преобразователя или ИП и формирующее управляющий сигнал, который передается на исполнительный элемент. Такие устройства называют устройствами «центральной части», так как они непосредственно с управляемым объектом не связаны. Конструктивно устройства «центральной части» регуляторов могут иметь исполнение нескольких типов: аппаратного, приборного, блочного и элементного.

Регуляторы *аппаратного типа* выполнены в виде отдельного устройства, к которому подсоединяются ИП и исполнительное устройство, например регуляторы температуры типа РТ-1, ТУДЭ, ПТР.

В регуляторах *приборного типа* сигнал ИП поступает на вторичный прибор, а с него - в регулятор. Например, автоматический электронный мост типа МСР имеет вторичный реостатный задатчик, с которого снимается сигнал и подается в регулятор.

Регуляторы *блочного типа* состоят из отдельных блоков: измерительного, усилительного, задающего, усилителей мощности и др. Примером может служить комплекс приборов автоматического регулирования постоянного тока типа «Каскад». Блоки имеют нормализованные габариты и могут монтироваться на щите, в шкафу или на пульте.

При *элементном исполнении* регулятор состоит из отдельных универсальных элементов, выполняющих простейшие операции. Из отдельных элементов построена система пневматических регуляторов «Старт» и др.

Закон регулирования, который формирует регулятор, представляет зависимость между регулируемым параметром и положением затвора регулирующего органа. Регуляторы

принято называть соответственно тому закону регулирования, который они реализуют.

2. **Пропорциональный регулятор** (П-регулятор) прямого действия, схема которого показана на рисунке 45, регулирует давление. Воспринимающим (чувствительным) элементом является мембрана 1, которая через шток 3 связана с регулирующим органом - клапаном 4. Пружина 2 служит датчиком давления.

Если в качестве сервопривода используется электродвигательный или гидравлический исполнительный механизм, то они охватываются жесткой обратной связью (рисунок 46а). При достаточно большом значении  $k_{oc}$  регулятор в динамическом отношении будет усилительным звеном.

Величина  $k_{oc}$  называется пределом пропорциональности  $D$ . Если  $D > 100\%$ , то регулирующий орган перемещается только на часть полного хода при изменении  $x$  от минимума до максимума.

Примером П-регулятора непрямого действия может быть регулятор «Кристалл» с электрогидравлическим исполнительным механизмом ГИМ. С выходным валом исполнительного механизма жестко связан сердечник дифференциально трансформаторного преобразователя, выход которого присоединен к одному из выходов регулятора.

Основное достоинство П-регулятора - быстроедействие. Его применяют для регулирования объектов без самовыравнивания и в тех случаях, когда в объектах наблюдаются частые отклонения нагрузки. Недостаток П-регулятора - остаточное отклонение регулируемого параметра.

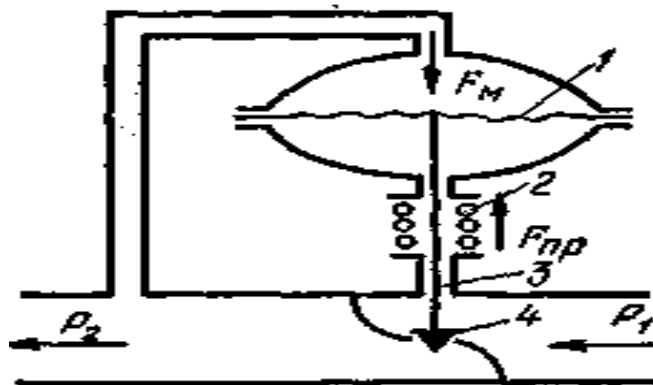


Рисунок 45 - Регулятор давления прямого действия

**Интегральный регулятор** (И-регулятор). В промышленных регуляторах И-закон регулирования получают в том случае, когда структурная схема регулятора составлена из последовательно включенных усилительного и интегрирующего звеньев (рисунок 46б).

Интегрирующим звеном обычно служит гидравлический или электродвигательный исполнительный механизм.

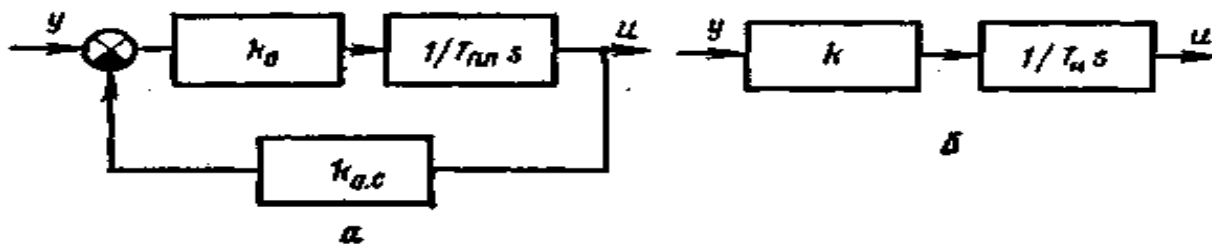


Рисунок 46 - Структурные схемы: а - П-регулятора; б - И-регулятора

В качестве примера И-регулятора можно представить регулятор «Кристалл» с гидравлическим исполнительным механизмом ГИМ, если не будет обратной связи. При отклонении регулируемого параметра  $y$  от заданного значения открывается электромагнитный клапан исполнительного механизма ГИМ и вода под давлением перемещает поршень, поворачивая выходной вал регулирующего органа до тех пор, пока отклонение регулируемого параметра от заданного значения не уменьшится до нуля. Когда отклонение равно нулю, электромагнитный клапан ГИМ закрывается и поршень (и, следовательно, вал привода) останавливается в этом положении. Скорость перемещения затвора регулирующего органа зависит от значения  $T_u$ . Чем больше  $T_u$  тем меньше скорость перемещения регулирующего органа. Если скорость перемещения велика, то даже при незначительном отклонении регулируемого параметра от заданного значения затвор успеет пройти из одного крайнего положения в другое и действие И-регулятора будет аналогично действию релейного регулятора.

Положительная особенность И-регуляторов заключается в том, что в установившемся режиме значение регулируемого параметра остается постоянным независимо от изменения нагрузки объекта, то есть И-регуляторы являются астатическими. Они допускают значительное изменение нагрузки.

Недостаток И-регуляторов - большое время регулирования, поэтому они неприменимы на объектах без самовыравнивания.

**Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы).** В промышленных регуляторах ПИ-закон регулирования достигается введением гибкой обратной связи, охватывающей исполнительный механизм и усилитель регулятора (рисунок 47а).

В цепь обратной связи включается реальное дифференцирующее звено (состоящее из дифференцирующего звена и апериодического звена, соединенных последовательно).

Механизм гибкой обратной связи называется изодромом, а сам регулятор - изодромным.

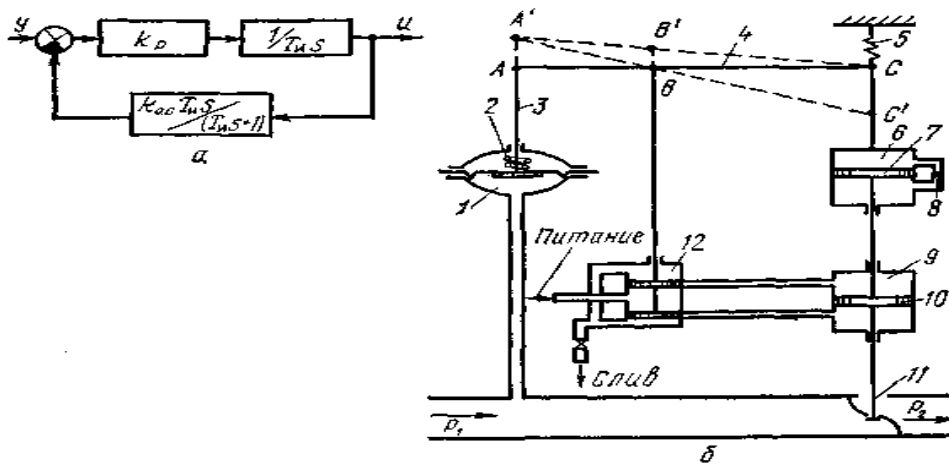


Рисунок 47 - ПИ-регулятор: а - структурная схема; б - схематическое изображение

ПИ-регуляторы, как правило, непрямого действия. Схема гидравлического ПИ-регулятора показана на рисунке 47а. Механизм обратной связи, или изодрома, состоит из заполненного маслом цилиндра 6, поршня 7 и пружины 5. Полости цилиндра сообщаются через регулируемый дроссель 8. Поэтому скорость перемещения поршня 7 зависит от степени открытия дросселя 8. Регулятор регулирует давление  $p_1$  путем изменения степени открытия клапана 11: если давление  $p_1$  увеличивается, то клапан открывается и давление уменьшается. При увеличении давления  $p_1$  мембрана 1 прогибается, преодолевая сопротивление пружины 2, и точка  $A$  штока 3 перемещается в  $A'$ . Точка  $B$  также перемещается в точку  $B'$  и перемещает золотниковый механизм гидропривода вверх, открывая доступ жидкости в верхнюю часть цилиндра 9. Поршень 10 перемещается вниз и открывает затвор 11. В это время регулятор работает как П-регулятор. Так как масло в цилиндре 6 не успевает быстро протекать через небольшое отверстие дросселя 8, то вместе с поршнем 7 перемещается в точку  $C$  и конец рычага 4 обратной связи, растягивая пружину 5. Это вызывает обратное перемещение плунжера золотника 12 в его среднее положение, и серводвигатель выключается. Усилие растянутой пружины 5 вызывает перемещение цилиндра 6 вверх со скоростью, зависящей от скорости перетекания масла из нижней полости в верхнюю через дроссель 8. При этом рычаг 4 поворачивается вокруг точки  $A'$ , поднимает плунжер золотника 12 и вызывает дополнительное перемещение затвора 11 регулирующего клапана вниз, уменьшая давление  $p_1$ . Регулятор действует до тех пор, пока не исчезнет деформация пружины 5. При этом регулируемое давление  $p_1$  возвращается к заданному значению, а затвор 11 занимает новое положение. Время действия обратной связи - время изодрома  $T_u$  определяется степенью открытия регулируемого дросселя 8. Если дроссель полностью закрыт, то гибкая обратная связь превращается в жесткую ( $T_u \rightarrow \infty$ ), а ПИ-регулятор по своему действию становится пропорциональным. Если дроссель полностью открыт, то время изодрома  $T_u \rightarrow 0$  и ПИ-регулятор становится интегральным. В

промежуточных состояниях открытия дросселя он обладает свойствами пропорционального и интегрального регулятора. Время, в течение которого затвор регулирующего органа под действием интегральной составляющей удвоит предварительное перемещение, полученное за счет действия пропорциональной составляющей, называют временем удвоения.

В электронно-гидравлическом регуляторе «Кристалл» гибкая обратная связь для формирования ПИ-закона регулирования образуется при помощи двух пар сильфонов и дифференциально-трансформаторного преобразователя. Механизм гибкой обратной связи показан на рисунке 48.

При перемещении поршня электрогидравлического исполнительного механизма поворачивается вал и через тягу 6 вызывает растяжение одного сильфона и сжатие другого. Например, при движении поршня вниз сильфон 1 будет растягиваться, а сильфон 2 сжиматься. Давление воздуха в сильфоне 2 увеличится, а в сильфоне 1 понизится. Воздух из сильфона 2 будет перетекать в сильфон 4, а из сильфона 3 - в сильфон 1, перемещая промежуточный рычаг 7, связанный с сердечником дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Возникающая в сильфонах разность давлений вызывает переток воздуха через регулируемый дроссель 5. Постепенно давление в сильфонах выравнивается, сердечник преобразователя возвращается в среднее положение и сигнал обратной связи становится равным нулю.

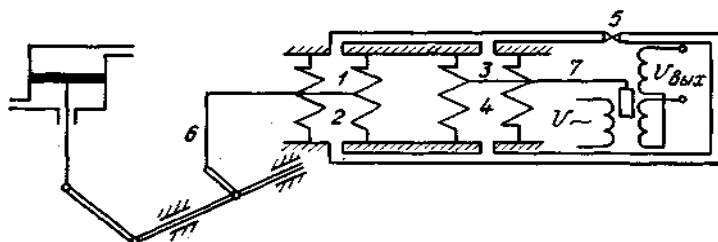


Рисунок 48 - Схема гибкой обратной связи ГИМ

Изодромные регуляторы могут применяться как для объектов с самовыравниванием, так и без самовыравнивания в тех случаях, когда необходима большая точность регулирования при больших, но плавных изменениях нагрузки.

**Изодромные регуляторы с предварением (ПИД-регуляторы)** применяются на объектах, не допускающих статической ошибки, нагрузка которых меняется часто, а также имеется запаздывание. Затвор регулирующего органа ПИД-регулятора перемещается пропорционально отклонению, интегралу и скорости отклонения регулируемого параметра.

ПИД-закон регулирования на практике получают подключением блока предварения к ПИ-регулятору. Блок предварения выдает сигнал пропорциональной скорости изменения регулируемого параметра и включается либо в измерительную, либо в управляющую цепь регулятора.

**Релейные регуляторы.** Релейными называют регуляторы, у которых регулирующий орган перемещается скачком из одного крайнего положения в другое всякий раз, когда регулируемый параметр достигает некоторого определенного значения, называемого пороговым. Регулирующий орган может занимать крайние позиции в пределах своего хода.

Наибольшее распространение получили двух- и трехпозиционные регуляторы. Статические характеристики идеализированного и реального, двухпозиционного регулятора показаны на рисунке 49.

Реальный регулятор имеет зону нечувствительности, которая характеризует величину отклонения порогов срабатывания регулятора от заданного значения регулируемого параметра. В реальных двухпозиционных регуляторах зона нечувствительности является параметром настройки и называется *дифференциалом*.

Двухпозиционные регуляторы применяются для управления объектами с малым запаздыванием и с большой постоянной времени: например, для регулирования уровня воды в резервуарах больших водокачек, для регулирования температуры и влажности в теплицах и животноводческих помещениях. Регулятор поддерживает среднее заданное значение регулируемого параметра, хотя сам параметр изменяется, совершая незатухающие колебания. Амплитуда и период колебаний параметра зависят от зоны, нечувствительности регулятора.

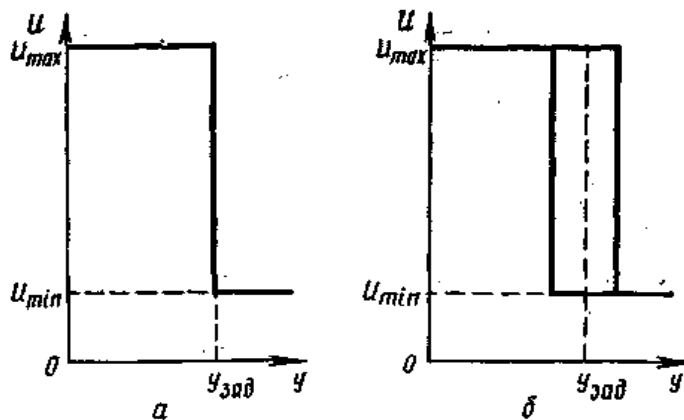


Рисунок 49 - Характеристика идеального (а) и реального (б) двухпозиционного регулятора

Простейшими двухпозиционными регуляторами являются контактные термометры типа ТЭК, dilatометрические электрические терморегуляторы типа ТРДЭ и др.

Контактные термометры имеют два или три контакта, впаянные в стекло капилляра. Чувствительный элемент - ртуть, при нагревании она расширяется и замыкает контакты.

В dilatометрическом терморегуляторе типа ТРДЭ чувствительные элементы - dilatометрическая трубка и стержень, имеющие разные

коэффициенты линейного расширения: трубка изготовлена из материала с большим коэффициентом расширения (латунь), чем стержень (инвар). Кинематическая схема регулятора показана на рисунке 50.

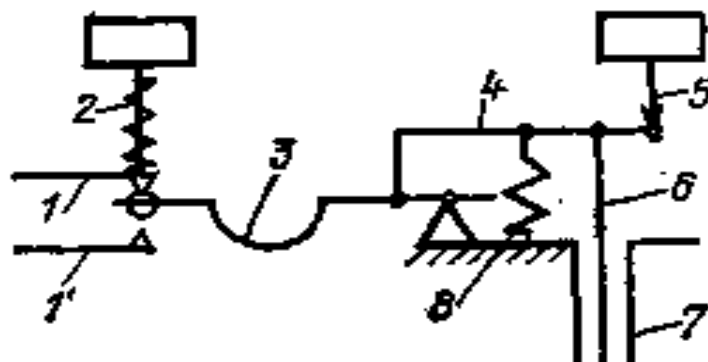


Рисунок 50 - Кинематическая схема терморегулятора ТРДЭ

При снижении температуры трубка 7 укорачивается и стержень 6 поднимается. Конец рычага 4 перемещает подвижный переключающий контакт 3, который замыкает цепь с контактом 1' и размыкает с контактом 1. Винт задания 5 предназначен для установки задания температуры, а винт 2 - для установки дифференциала.

Контактные группы, встроенные в первичные или во вторичные приборы, используются также для позиционного регулирования. Примером могут служить пружинные манометры ЭКМ и МПЧ-4 для измерения и регулирования давления, логометры ЛР, вторичные мосты и потенциометры типа КВП для контроля и регулирования температуры и др. В виде отдельного прибора выполнены электронные регуляторы типов ПТР-2, РТ-2, РТБ-2, МЭТРС-2 и др.

Блок-схема двухпозиционного бесконтактного регулятора температуры РТБ-2 показана на рисунке 51.

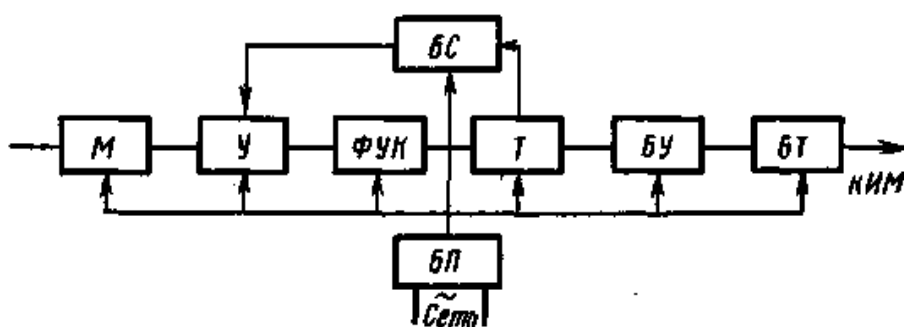


Рисунок 51 - Блок-схема регулятора типа РТБ-2

РТБ работает в комплекте с медным термометром сопротивления. При отклонении температуры от заданного значения на мостовой схеме М

возникает напряжение разбаланса, которое поступает на вход усилителя У, где оно алгебраически складывается с опорным напряжением блока БС, формирующим сигнал дифференциала. Усиленное напряжение поступает на вход фазочувствительного каскада (усилителя) ФЧК, который управляет триггером Т. Блок управления БУ формирует управляющие сигналы для включения тиристоров блока БТ, к которому присоединяется исполнительный механизм.

Двухпозиционный регулятор типа ПТР-2 имеет аналогичную схему, за исключением того, что в нем триггер управляет выходным реле, контакты которого выведены и используются - в цепи управления исполнительным механизмом.

Регулирующая аппаратура комплекса «Каскад» рассчитана на входные унифицированные сигналы постоянного тока 0-5 и 0-20 мА. В состав системы входят блоки измерительный, суммирования, умножения, деления, извлечения квадратного корня, ограничения, регулирующие блоки, дифференцирования, тиристорный усилитель и блоки управления, защиты, индикации и задатчики.

Структура комплекса «Каскад» показана на рисунке 52.

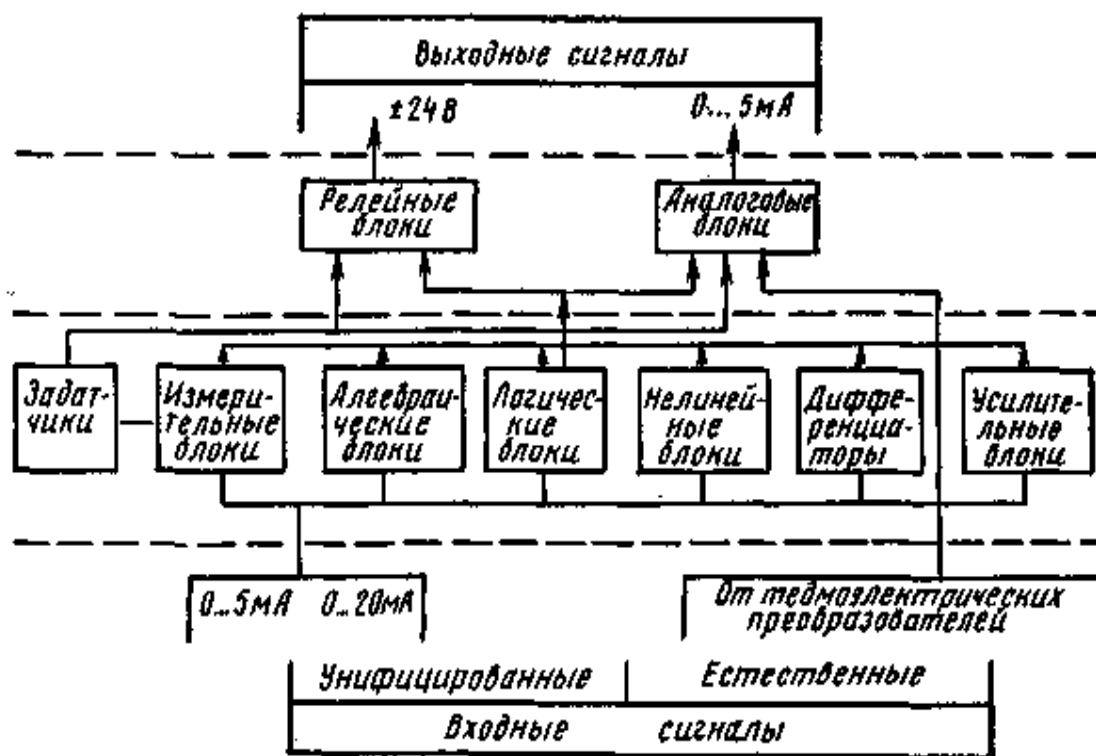


Рисунок 52 - Структура комплекса «Каскад»

С более широкими возможностями автоматического регулирования выпускают аналоговый комплекс электрических средств регулирования (АКЭСР).

Путем агрегатирования блоков АКЭСР могут быть построены разнообразные схемы регулирования и управления технологическими



процессами, начиная от простейших позиционных регуляторов до самых сложных многоконтурных систем централизованного контроля и управления.

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) состоит из пневматических усилителей, реле и других элементов, являющихся аналогами соответствующей электрической и электронной аппаратуры.

Конструктивно отдельные элементы выполнены из квадратных секций (40x40 мм) и снабжены латунными ножками, имеющими унифицированные размеры. Элементы при помощи ножек крепятся в коммутационных пластинах (платах) из органического стекла. Связь между элементами осуществляется через отверстия в ножках и платах. Если в регулятор входит несколько плат, то они соединяются между собой гибкими шлангами.

В качестве входных и выходных сигналов элементов УСЭППА используются унифицированные пневматические сигналы 20-100 кПа. Давление питания 140 кПа.

На основе элементов УСЭППА построена система автоматических регуляторов «Старт», «Центр» и др.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какое устройство называется регулятором?
2. По каким признакам классифицируются регуляторы?
3. Расскажите о конструкции и принципе действия различных регуляторов.

#### 14 Технико-экономическая эффективность

##### **План:**

1. Понятие экономической эффективности.
2. Методика оценки экономической эффективности.

1. Автоматизация производства открывает возможности для облегчения и оздоровления условий работы человека, повышения производительности труда, увеличения выпуска продукции и повышения ее качества. Однако полностью автоматизировать можно только те технологические процессы, в которых исключен ручной труд. Следовательно, первое и основное требование к автоматизированному процессу - его механизация, как по основным, так и по вспомогательным операциям. Но далеко не каждый, даже полностью механизированный процесс поддается автоматизации. Более того, отдельные простейшие технологические операции не могут быть автоматизированы без коренной перестройки технологического процесса. Поэтому автоматизацию технологических процессов нельзя рассматривать как надстройку над базисом (технологией). Автоматизация - это неотъемлемая часть управляемого технологического процесса, обеспечивающая повышение его эффективности.

Под *эффективностью системы автоматизации* принято понимать ее приспособленность к выполнению задачи, определенной алгоритмом функционирования. Судить об эффективности системы можно только по

определенным количественным критериям, которые называются показателями эффективности. Показатели эффективности могут быть как технические, так и экономические. В качестве технических показателей обычно используются вероятность безотказной работы или математическое ожидание времени безотказной работы. Для осуществления автоматизации производственно-технологических процессов обычно требуются дополнительные капитальные затраты на определенных этапах проектирования, монтажа и эксплуатации систем автоматики. В результате внедрения автоматизации обычно снижаются издержки производства на единицу продукции, и повышается производительность труда. В связи с этим в качестве экономических показателей эффективности рекомендуется использовать срок окупаемости первоначальных капитальных затрат, коэффициент относительной рентабельности капиталовложений в автоматизацию, процент снижения уровня себестоимости единицы продукции и процент снижения удельных капитальных затрат на единицу продукции. В связи с тем, что при внедрении систем автоматизации могут быть использованы различные варианты и оценочные критерии, возникает необходимость оценить сопоставимость вариантов.

2. Для этих целей обычно используют методику оценки эффективности по приведенным затратам.

*Срок окупаемости первоначальных капитальных затрат*  $T_{ок}$  - важнейший обобщающий показатель экономической эффективности автоматизации производства:

$$T_{ок} = \frac{K_a - K}{(C_{1a} - C_{1a})N_a Z_{1a} - (C_1 - C_1)N_1 Z_1} \quad (119)$$

где  $K_a$  и  $K$  - соответственно первоначальные капитальные вложения в автоматизированный и неавтоматизированный процесс;  $C_{1a}$  и  $C_1$  - себестоимость единицы произведенной продукции;  $C_{1a}$  и  $C_1$  закупочная (реализационная) цена единицы продукции;  $N_a$  и  $N$  - численность производственных рабочих, чел.;  $Z_{1a}$  и  $Z_1$  - готовая выработка продукции на одного рабочего.

Если в результате автоматизации повышается качество продукции, то  $C_{1a} > C_1$ , если же качество остается на первоначальном уровне, то  $C_{1a} = C_1$ . При этом годовой объем производства продукции после автоматизации на одного рабочего обычно может быть больше, чем при неавтоматизированном производстве. При сохранении постоянного объема производства продукции автоматизация будет обеспечивать *повышение производительности труда*:

$$\Delta P_{mp} = \frac{Z_{1a} - Z_1}{Z_1} 100\%, \quad (120)$$

$$\Delta P_{mp} = \frac{N - N_a}{N_a} 100\%, \quad (121)$$

где  $\Delta\Pi_{mp}$  - повышение производительности труда, %.

Аналогично определится *снижение затрат труда*:

$$\Delta T_{mp} = \frac{1/Z_1 - 1/(Z_1 a)}{1/Z_1} = [(Z_{1a} - Z_1)/Z_{1a}] \cdot 100\%, \quad (122)$$

$$\Delta T_{mp} = [(T_{mp} - T_{mp(a)})/T_{mp}] \cdot 100\%, \quad (123)$$

где  $T_{mp}$  и  $T_{mp(a)}$  - соответственно затраты труда на единицу продукции до автоматизации и после, ч.

Другой важный обобщающий показатель эффективности *рентабельность* производства, которая характеризует уровень доходности (относительную величину чистого дохода):

$$P = [(Ц - C)/C] \cdot 100\% \quad (124)$$

где  $Ц$  - оптовая цена всей произведенной продукции;  $C$  - себестоимость произведенной продукции.

Вследствие автоматизации производства появляется *дополнительная рентабельность*:

$$\Delta P = [(C - C_a)/C] \cdot 100\% \quad (125)$$

где  $C$  и  $C_a$  - соответственно себестоимость продукции до автоматизации и после.

При автоматизации производственных технологических процессов обычно численность рабочих снижается, а уровень средней заработной платы рабочего повышается, так как требуются рабочие более высокой квалификации. Из-за этого темп снижения себестоимости продукции (связанного с повышением производительности труда) при внедрении автоматизации отстает от темпа повышения производительности труда. Это *снижение себестоимости* можно определить, пользуясь выражением:

$$\Delta C^* = [(\Delta\Pi_{mp} - \Delta Z)/(100 + \Delta\Pi_{mp})] \gamma Z \quad (126)$$

где  $\Delta Z$  - процент повышения уровня средней зарплаты рабочего (обычно  $\Delta\Pi_{mp} > \Delta Z$ ), %;  $\gamma Z$  - удельный вес зарплаты в себестоимости произведенной продукции до внедрения автоматизации.

Иногда в качестве показателя экономической эффективности используют так называемый *коэффициент дополнительных капитальных вложений* (часто его называют *коэффициентом относительной рентабельности капитальных*

вложений в автоматизацию). Он представляет собой величину, обратную сроку окупаемости, выраженную в процентах:

$$K_0 = (1/T_{ок}) \cdot 100 \% \quad (127)$$

Коэффициент относительной рентабельности капиталовложений в автоматизацию показывает, какая часть первоначальных капитальных вложений в автоматизацию производства окупается в течение года. При техникоэкономическом сравнении вариантов и оценке эффективности внедрения автоматизации наиболее целесообразно использовать *методику приведенных затрат*:

$$З_{пр} = I + E_n K, \quad (128)$$

где  $K$  - капитальные затраты по каждому варианту;  $I$  - годовые издержки производства продукции по тому же варианту;  $E_n$  - отраслевой нормативный коэффициент эффективности (коэффициент приведения), численно равный величине, обратной нормативному сроку окупаемости:  $E_n = 1/T_n$ .

Отраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений принимается равным 0,15. Расчет *годового экономического эффекта* от внедрения механизации и автоматизации производства сельско- хозяйственной продукции ведут, исходя из минимума приведенных затрат:

$$\mathcal{E} = (З_{1пр} - З_{1пр а}) V_a, \quad (129)$$

где  $З_{1пр}$  и  $З_{1пр а}$  - соответственно приведенные затраты на единицу продукции до и после внедрения автоматизации;  $V_a$  - годовой объем производства продукции (в натуральных единицах).

С учетом выражений (128) и (129) получаем:

$$\mathcal{E} = [(I_1 + E_n K_1) - (I_{1а} + E_n K_{1а})] V_a, \quad (130)$$

где  $K_1$  и  $K_{1а}$  - соответственно удельные капитальные вложения до и после внедрения автоматизации.

Если обозначить изменение издержек при производстве продукции вследствие внедрения автоматизации через  $\Delta I$ , а дополнительные капитальные вложения на автоматизацию через  $\Delta K$ , выражение (130) примет вид:

$$\mathcal{E} = \Delta I - E_n \Delta K. \quad (131)$$

*Капитальные вложения на автоматизацию* на всех этапах разработки и монтажа автоматизированной системы:

$$K = K_p + K_n + K_k + K_m, \quad (132)$$

где  $K_p$  - затраты на разработку и проектирование;

$K_n$  - доля общепроизводственных затрат на автоматизацию;  $K_k$  - стоимость комплектующих изделий;  $K_m$  - затраты на монтаж.

Если срок введения в эксплуатацию автоматизированной системы больше года, то при постоянстве издержек производства в качестве капитальных вложений  $K$  рекомендуется принимать их суммарную приведенную величину:

$$K_{np} = \sum_{t=1}^T K_t (1 + E_n)^{T-t} \quad (133)$$

где  $K_t$  - капитальные вложения на  $t$ -й год ( $t=1, 2 \dots T$ );

$T$  - срок создания и монтажа системы.

Общие годовые издержки автоматизированного производства для первого года эксплуатации при этом определяются из выражения:

$$I = I_n + I_u + I_a + I_m + I_{\text{Э}} + I_{\text{м.о.}} + I_{np}, \quad (134)$$

где  $I_n$  - затраты на пусконаладочные работы (для последующих лет);  $I_u$  - затраты на поверку и наладку;  $I_a$  - амортизационные отчисления (на реновацию и капитальный ремонт);  $I_m$  - затраты на материалы и вспомогательное оборудование, необходимые для обеспечения производства;  $I_{\text{Э}}$  - затраты на все виды потребляемой энергии;  $I_{\text{м.о.}}$  - затраты на техническое обслуживание и ремонт системы, включая зарплату обслуживающего персонала;  $I_{np}$  - общепроизводственные затраты.

Затраты на пусконаладочные работы определяют, исходя из объема работ, на наладку электрических установок, средств автоматики и КИП. Амортизационные отчисления на реновацию и капитальный ремонт определяют в процентах от общей суммы капитальных затрат:

$$I_a = a \cdot K, \quad (135)$$

где  $a$  - норма амортизационных отчислений, %;  $a = a_{k-p} + a_p$ .

Норма амортизационных отчислений на все машины и комплекты оборудования для животноводства и птицеводства устанавливается в пределах 14,2%; на электронные вычислительные машины - 19%, в том числе на капитальный ремонт 13%, на полное восстановление 6%, на измерительные и регулирующие приборы и устройства - 12% (соответственно 2 и 10%) и т.д. в соответствии с нормами амортизационных отчислений.

Затраты на материалы и вспомогательное оборудование, необходимые для обеспечения производства, включают в себя стоимость кормов,

транспортные расходы и т.п.

*Общеэнергетические затраты*  $I_{\Sigma}$  включают стоимость электрической энергии, а также других видов энергии, необходимых для обеспечения функционирования системы. *Затраты на техническое обслуживание и ремонт* включают в себя стоимость запасных частей и материалов, необходимых для производства плановых эксплуатационных мероприятий с целью обеспечения надежного функционирования системы, а также основную и дополнительную зарплату обслуживающего персонала:

$$I_{т.о.} = I_{м.з} + I_{з.п.}, \quad (136)$$

где  $I_{м.з}$  - стоимость материалов и запчастей, необходимых на расчетный срок эксплуатации (например, один год);  $I_{з.п.}$  - основная и дополнительная зарплата обслуживающего персонала:

$$I_{з.п.} = (1 + \alpha) \left( \sum_{i=1}^{n_1} N_{ИТР} Q_{ИТР} + \sum_{i=1}^{n_2} N_{сл} q_{сл} \Phi_{\Sigma 1} \right) \quad (137)$$

где  $N_{ИТР}$ ,  $N_{сл}$  - соответственно численность ИТР и технического персонала, чел.;  $Q_{ИТР}$  - годовой фонд зарплаты ИТР;  $q_{сл}$  - часовая тарифная ставка технического персонала (слесаря, электромонтера и т. п.),  $\Phi_{\Sigma 1}$  - годовой фонд рабочего времени одного работника, ч;  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий долю дополнительной оплаты технического персонала и процент отчислений на социальное страхование.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое эффективность автоматизации технологических процессов?
  2. Срок окупаемости.
  3. Социальное страхование.
- Цена единицы продукции.

## Заключение

В учебном пособии рассмотрены следующие темы:

- Основные понятия и принципы построения систем автоматического управления (САУ).
- Математическое описание линейных непрерывных систем управления.
- Устойчивость систем автоматического управления.
- Виды и типы схем автоматизации.
- Технические средства автоматизации. Общие сведения.
- Воспринимающие элементы и датчики.
- Сравнивающие устройства.
- Задающие устройства.
- Усилители.
- Исполнительные устройства.
- Реле автоматики.
- Логические элементы.
- Регуляторы.
- Технико-экономическая эффективность.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и дистанционной форм обучения образовательных программ: 5В071800/6В07102 – Электроэнергетика. Данное учебное пособие может быть использовано студентами других образовательных программ.

## Список использованных источников

1. Мартыненко И.И. и др. Автоматика и автоматизация производственных процессов. Режим доступа [https://www.studmed.ru/martynenko-ii-golovinskiy-bl-i-dr-avtomatika-i-avtomatizaciya-proizvodstvennyh-processov\\_8be15de2f30.html](https://www.studmed.ru/martynenko-ii-golovinskiy-bl-i-dr-avtomatika-i-avtomatizaciya-proizvodstvennyh-processov_8be15de2f30.html).
2. Мартыненко И.И. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматики. Режим доступа [https://www.studmed.ru/martynenko-ii-lysenko-vf-proektirovanie-sistem-avtomatiki\\_8695ef45d88.html](https://www.studmed.ru/martynenko-ii-lysenko-vf-proektirovanie-sistem-avtomatiki_8695ef45d88.html).
3. Бородин И.Ф. Технические средства автоматики. Режим доступа <https://search.rsl.ru/ru/record/01001083274>.
4. Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. Режим доступа <https://mexalib.com/view/16998>.
5. Сборник задач по теории автоматического регулирования. Под ред. В.А. Бесекерского. Режим доступа [https://www.studmed.ru/besekerskiy-va-gerasimov-an-i-dr-sbornik-zadach-po-teorii-avtomaticheskogo-regulirovaniya-i-upravleniya\\_108fe1627c7.html](https://www.studmed.ru/besekerskiy-va-gerasimov-an-i-dr-sbornik-zadach-po-teorii-avtomaticheskogo-regulirovaniya-i-upravleniya_108fe1627c7.html).
6. Теория автоматического управления: учеб. пособие / М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина; под ред. д.т.н., проф. В.И. Лачина. – ростов н/Д: Феникс, 2017.
7. Бохан Н.И., Фурунжиев Р.И. Основы автоматики и микропроцессорной техники. Режим доступа <https://www.twirpx.com/file/830092/>.
8. Майзель М.М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами. Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 2013.
9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. Режим доступа [https://www.studmed.ru/besekerskiy-va-popov-ep-teoriya-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya\\_2d526944272.html](https://www.studmed.ru/besekerskiy-va-popov-ep-teoriya-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya_2d526944272.html).
10. Теория автоматического управления: Учеб. Для вузов/С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высшая школа, 2013.
11. Колесов Л.В. Основы автоматики. Режим доступа [https://litmy.ru/knigi/наука\\_учеба/48531-osnovy-avtomatiki.html](https://litmy.ru/knigi/наука_учеба/48531-osnovy-avtomatiki.html).
12. Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. Режим доступа [https://www.studmed.ru/martynenko-ii-lysenko-vf-proektirovanie-sistem-avtomatiki\\_8695ef45d88.html](https://www.studmed.ru/martynenko-ii-lysenko-vf-proektirovanie-sistem-avtomatiki_8695ef45d88.html).