Маслов Е.А.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

(письменные лекции)

Томск 2009

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 1.

Литература.

Основная:
1. Теория автоматического управления. Ч.1. Под. Ред. А.А. Воронова. Учебное пособие. –М.: Высшая школа, 1986 г.
2. Теория автоматического управления. Ч.2. Под. Ред. А.А. Воронова. Учебное пособие. –М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Плетников С.Б., Силуянов Д.Б. Автоматизация технологических процессов тепловых электростанций. –М.: Испо – Сервис, 2001. – 156с.
4. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами ТЭС. Учебное пособие. – М.: Энергоиздат, 1981 г.
5. Андык В.С. Лабораторный практикум по дисциплине ТАУ для студентов специальности 210200, Томск, изд. ТПУ, 1998 г.
6. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. Учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1986 г.

Дополнительная:

7. Кориков А.М. Основы теории управления: Учебное пособие. 2-е изд. – Томск: НЛТ, 2002. – 392 с.
8. Автоматизация крупных тепловых электростанций / Под редакцией М.П. Шальмана. – М.: Энергия, 1974 г.
9. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / Под редакцией В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987 г.

Механизацией в промышленном производстве обычно называют применение машин и специальных устройств или приспособлений, заменяющих физический труд человека.

Пример. На ТЭС в этих целях используются передвижные подъемные краны и экскаваторы (разгрузка и перегрузка твердого топлива), механические и гидравлические транспортеры сыпучих материалов (угля и золы), электроприводы запорных и регулирующих органов (клапанов, задвижек), электроприводы вспомогательных механизмов (тягодутьевых машин, насосов, углеразмольиых мельниц и др.). Человек в механизированном производстве призван непрерывно управлять машинами, механизмами и установками (включать или отключать их в требуемом порядке) и наблюдать за их действием.

Под управлением в технических системах понимается функция (работа, исполнение командных сигналов), обеспечивающая поддержание заданных режимов эксплуатации технологического оборудования и достижение поставленных целей.

Автоматизацией механизированного производства называют применение технических средств (от простейших измерительных приборов и регуляторов до вычислительных машин) и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах выработки, преобразования и передачи энергии (материалов, информации).

Примером простейшего автоматического регулятора служит первый регулятор промышленного назначения — регулятор уровня воды и барабане парового котла, разработанный и внедренный известным русским теплотехником И.И. Ползуновым еще в XVIII веке (1765 г.). Этот регулятор действует следующим образом (рис. В.1).

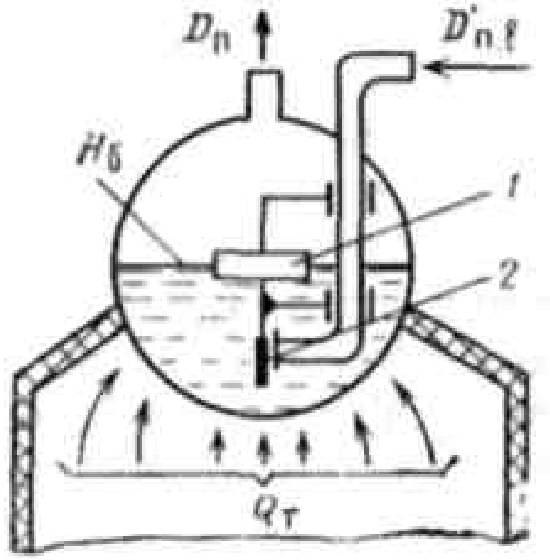


Рис. В.1. Регулятор уровня воды в барабане парового котла

При появлении небаланса между притоком поды в котел $D_{\text{П.В.}}$ и уходящим из него паром $D_{\text{П}}$ уровень воды в барабане (регулируемая величина) $H_{\text{Б}}$, начнет отклоняться от своего первоначального среднего значения (например, повышаться). Тогда поплавок (чувствительный элемент) 1, поднимаясь вдоль направляющей, начнет закрывать заслонку 2 (регулирующий орган) и тем самым уменьшать приток питательной воды в барабан. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока уровень не достигнет нового более высокого установившегося значения. В данном случае реализуется способ регулирования по отклонению, получивший название «принципа Ползунова – Уатта». Сущность его состоит в следующем: чем больше отклонение регулируемой величины, тем больше перемещение регулирующего органа в направлении, препятствующем этому отклонению. Уравнение движения регуляторов Ползунова – Уатта (закон регулирования) можно записать следующим образом:

$$x_p(t) = K_p\, y(t),$$

где $x_p(t)$ – перемещение регулирующего органа; $y(t)$ – отклонение регулируемой величины; K_p – коэффициент усиления регулятора.

В настоящее время наряду с регуляторами этого типа более широко применяются автоматические регуляторы непрямого действия, в которых регулирующий орган перемещается от внешнего источника энергии (электрического, гидравлического или пневматического). Регулирование по отклонению является основным принципом действия большинства современных автоматических регуляторов.

Автоматическое регулирование — автоматическое поддержание вблизи постоянного значения некоторой физической величины, характеризующей управляемый процесс.
Автоматический регулятор — устройство, которое вырабатывает регулирующее воздействие в соответствии с требуемым законом регулирования.

В автоматизированном производстве человек призван лишь периодически воздействовать на главные машины, механизмы и установки, определяющие нормальный ход технологического процесса, и наблюдать за наиболее важными его параметрами по показаниям приборов. Автоматизация тепловой части электрических станций предусматривает:

- дистанционное управление, или управление машинами и механизмами на расстоянии;
- теплотехнический контроль (измерение) текущих значений параметров технологического процесса;
- технологическую сигнализацию о состоянии основного и вспомогательного оборудования;
- автоматическую защиту основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;
- автоматическое непрерывное регулирование, обеспечивающее автоматическое поддержание технологических параметров вблизи заданного значения;
- логическое управление, обеспечивающее автоматическое включение или отключение регуляторов, машин, механизмов и установок в заданной последовательности.

Перечисленные функции выполняются одноименными подсистемами управления. Человек-оператор и подчиненные ему подсистемы должны управлять процессами выработки заданного количества теплоты и электрической энергии, поддерживать значения основных технологических параметров, чтобы обеспечить минимум расхода топлива.

Общие понятия

Автоматика – это отрасль науки и техники, охватывающая теорию и практику автоматического управления, а также принципы построения автоматических систем и образующих их технических средств.

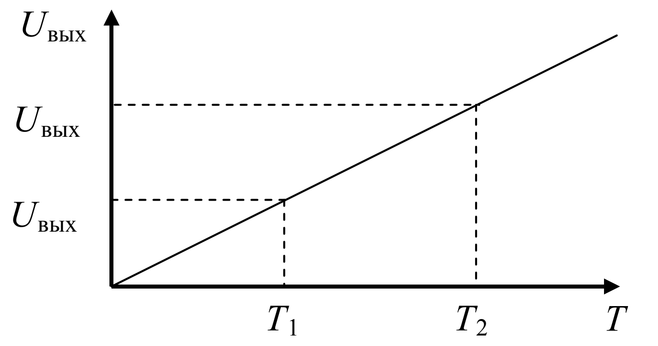
Система автоматического регулирования (управления) – состоит из объекта регулирования и регулятора.

Физическая величина которую система автоматического управления поддерживает на заданном значении, называется **регулируемой**.

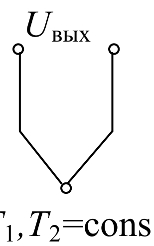
1. Контролируемые факторы (от них зависит работа АСР).
   а) Внутренние (расход и температура питающей воды).
   б) Внешние (расход, переток пара).
2. Неконтролируемые (магнитные бури и т.п.).

Работа объектов управления зависит от его статических и динамических характеристик.

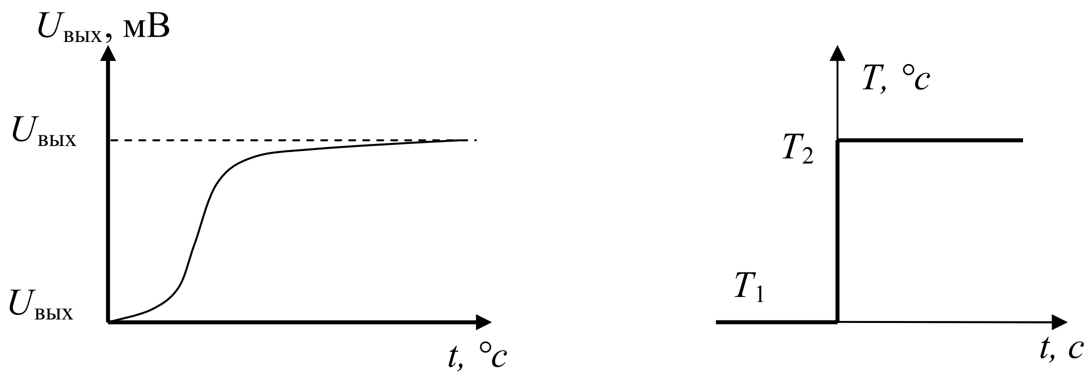
Статическая характеристика



ТЭП:



Динамическая характеристика



В динамике характеристики объектов или системы, как правило, представлены дифференциальными уравнениями и эти уравнения в общем случае, как правило, являются нелинейные, и их стараются представить в виде линейных.

Степени и формы автоматизации

<u>Степени:</u>

1. Частичная
2. Полная
3. Комплексная

При частичной степени автоматизированы основные участки производственного процесса отдельны.

При комплексной степени автоматизированы все основные участки производственного процесса.

При полной степени автоматизированы все основные и вспомогательные участки производственного процесса.

АСУТП – автоматическая система управления технического процесса.

Формы:

1. Технологическая сигнализация.
2. Дистанционное управление.
3. Автоматические защиты.
4. Контроль (первичные и вторичные преобразователи систем).
5. Автоматическое регулирование и управление.

Принципы регулирования и управления

При разработке автоматической системы прежде всего устанавливается необходимость автоматизации данного объекта, далее выбираются принципы регулирования и управления.

Принципы сформулированы в результате опыта инженерной практики.

Автоматическое регулирование – процесс поддержания заданного значения какой-либо физической величины в машинах, аппаратах или иных технических устройствах без непосредственного участия человека с помощью автоматических регуляторов.

Таким образом, система автоматического регулирования должна нейтрализовать с наименьшей ошибкой все возмущающие воздействия.

Автоматическое управление – процесс изменения по некоторому закону какой-либо физической величины в машинах, аппаратах или иных технических устройствах без непосредственного участия человека с помощью автоматических регуляторов.

Совокупность предписаний, по которым формулируется управляющее воздействие на объект, называется **законом регулирования или управления**.

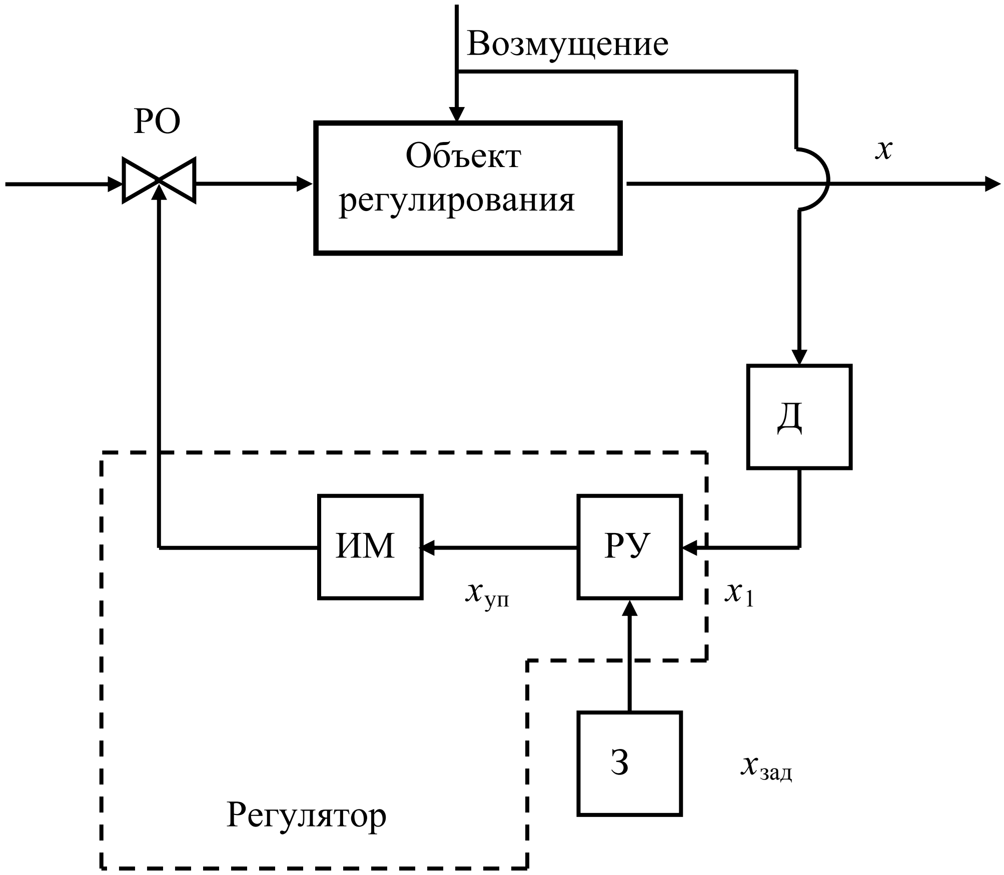
Математически закон регулирования определяется уравнением регулятора.

Принципы регулирования (управления)

Три принципа построения АСР:

1. По отклонению регулируемой величины (принцип Ползунова).
2. По компенсации возмущения.
3. Комбинированный.

- АСР по отклонению регулируемой величины:



РО – регулирующий орган (задвижка, клапан); Д – датчик (измеряет регулируемую величину x); РУ – регулирующее устройство; З – задатчик; ИМ – исполнительный механизм.

Принцип работы: если $x_1 \neq x_{зад}$ следовательно РУ посылает сигнал $x_{уп}$ на ИМ следовательно поворачивается РО для изменения x.

Эта АСР получила наибольшее распространение.

Достоинство схемы: регулируемая величина x постоянно находится под контролем.

Недостаток схемы: регулятор вступает в действие лишь после появления рассогласования между заданными значениями ($x_{зад}$) и действительным (x_1) регулируемой величины.

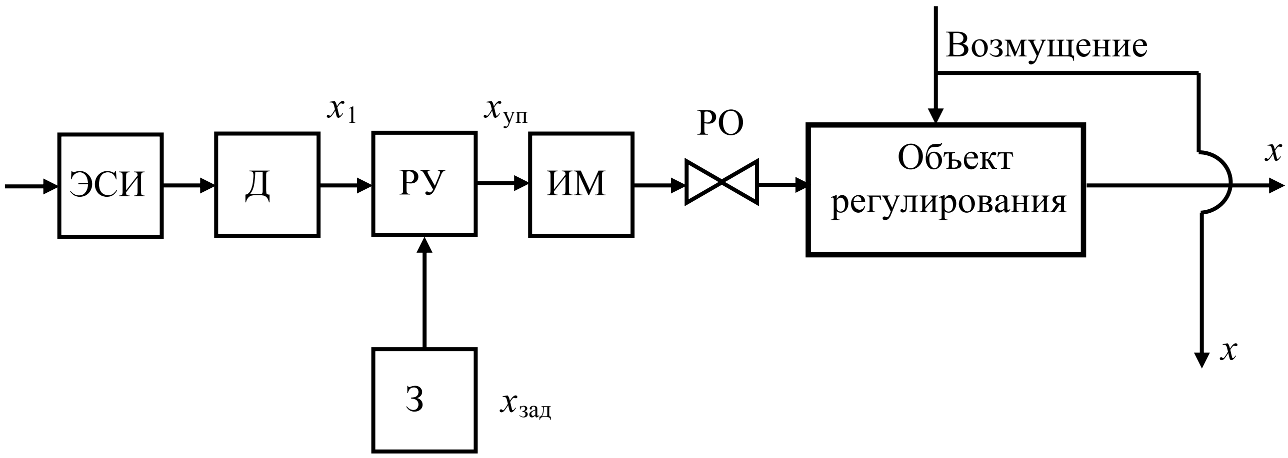
Таким образом, затруднено высокое качество регулирования.

- Схема с АСР по компенсации возмущения

В отличие от замкнутых систем АСР существуют разомкнутые системы, которые могут быть получены при устранении одной из связей контура. В рассматриваемом примере можно разомкнуть систему, перекрыв соединительную трубку регулятора.

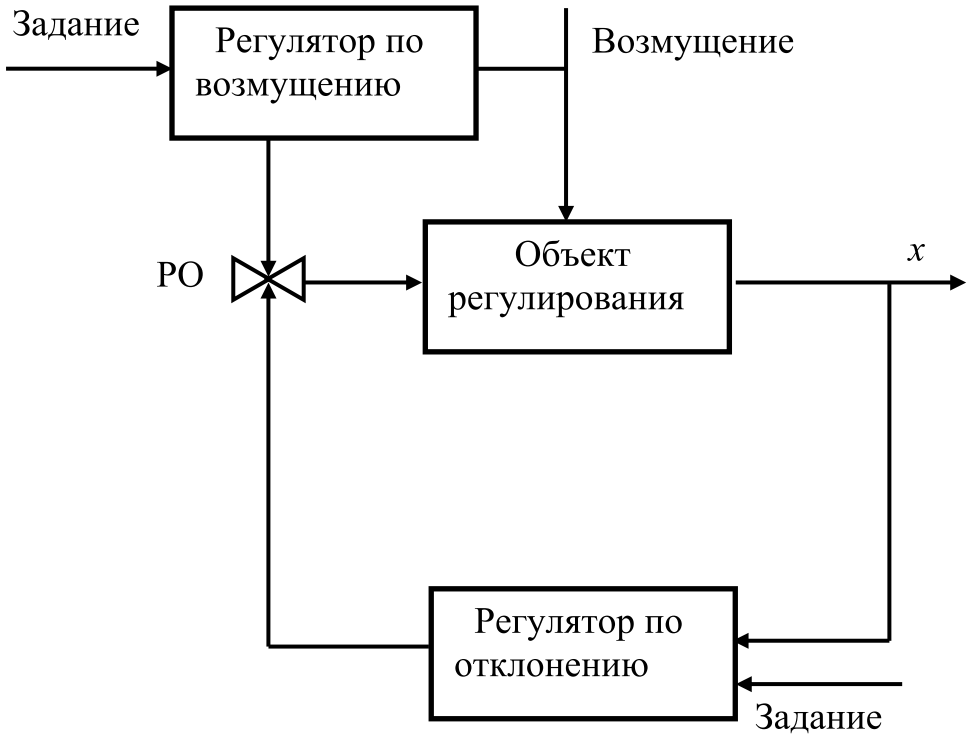
Достоинство схемы: обладает более высоким качеством регулирования, чем предыдущая АСР.

Недостаток схемы: регулированная величина может значительно отклониться от требуемого значения (из-за нерегулируемых возмущений).



ЭСИ – Элемент сравнения сигналов.

- Комбинированная АСР (лишена недостатков предыдущих двух схем)



Основные элементы автоматических систем:

1. Задающие элементы позволяют устанавливать предписанное значение выходной переменной объекта.
2. Чувствительные элементы предназначены для измерения выходной переменной или её отклонение от заданного значения.
3. Усилительные элементы служат для усиления сигнала полученного от чувствительного элемента.
4. Исполнительные элементы предназначены для создания управляющего воздействия на объект. В энергетике это, как правило, электродвигатели.

5. Преобразовательные элементы применяются в тех случаях, когда на выходе элемента надо получить величину отличающуюся от выходной, либо количественно, либо качественно.
6. Корректирующие и стабилизирующие устройства, служат для изменения динамических качеств системы или элементов. К таким элементам относятся дифференцирующие элементы или элементы обратных связей.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 2.

Степени и формы автоматизации

<u>Степени:</u>

1. Частичная
2. Полная
3. Комплексная

При частичной степени автоматизированы основные участки производственного процесса отдельны.

При комплексной степени автоматизированы все основные участки производственного процесса.

При полной степени автоматизированы все основные и вспомогательные участки производственного процесса.

АСУТП – автоматическая система управления технического процесса.

<u>Формы:</u>

1. Технологическая сигнализация.
2. Дистанционное управление.
3. Автоматические защиты.
4. Контроль (первичные и вторичные преобразователи систем).
5. Автоматическое регулирование и управление.

Принципы регулирования и управления

При разработке автоматической системы прежде всего устанавливается необходимость автоматизации данного объекта, далее выбираются принципы регулирования и управления.

Принципы сформулированы в результате опыта инженерной практики.

Автоматическое регулирование – процесс поддержания заданного значения какой-либо физической величины в машинах, аппаратах или иных технических устройствах без непосредственного участия человека с помощью автоматических регуляторов.

Таким образом, система автоматического регулирования должна нейтрализовать с наименьшей ошибкой все возмущающие воздействия.

Автоматическое управление – процесс изменения по некоторому закону какой-либо физической величины в машинах, аппаратах или иных технических устройствах без непосредственного участия человека с помощью автоматических регуляторов.

Совокупность предписаний, по которым формулируется управляющее воздействие на объект, называется **законом регулирования или управления**.

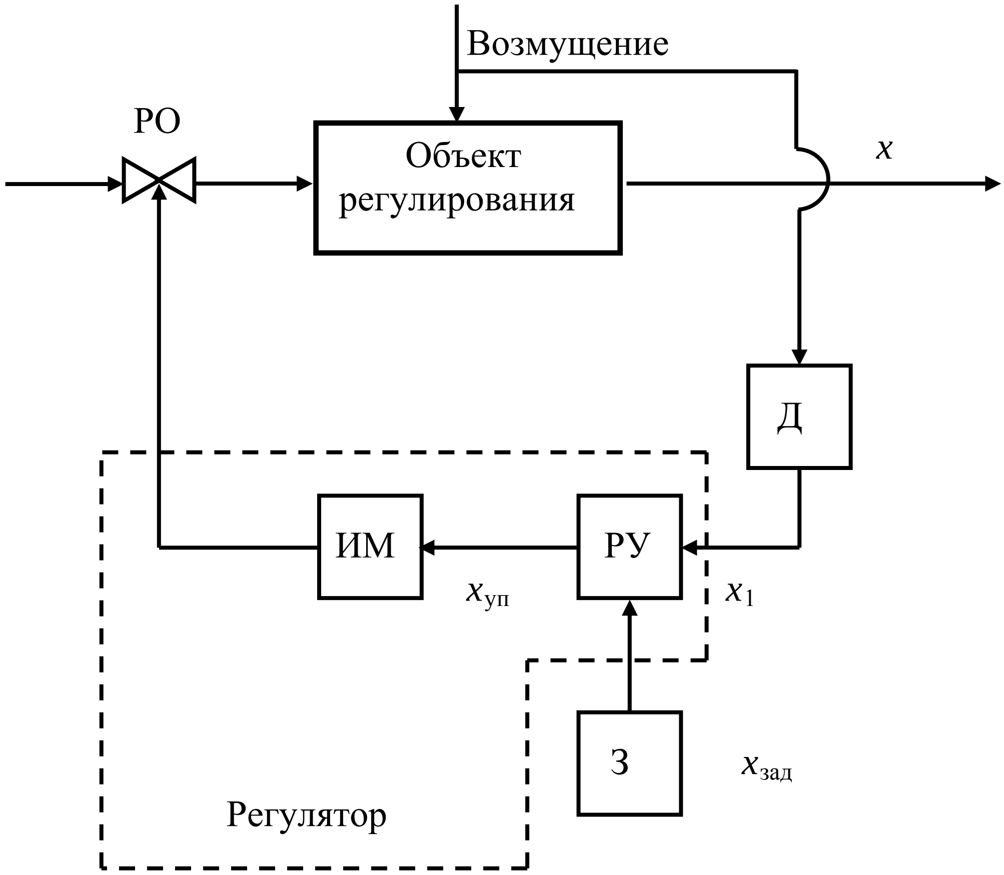
Математически закон регулирования определяется уравнением регулятора.

Принципы регулирования (управления)

Три принципа построения АСР:

1. По отклонению регулируемой величины (принцип Ползунова).
2. По компенсации возмущения.
3. Комбинированный.

- АСР по отклонению регулируемой величины:



РО – регулирующий орган (задвижка, клапан); Д – датчик (измеряет регулируемую величину x); РУ – регулирующее устройство; З – задатчик; ИМ – исполнительный механизм.

Принцип работы: если $x_1 \neq x_{зад}$ следовательно РУ посылает сигнал $x_{уп}$ на ИМ следовательно поворачивается РО для изменения x.

Эта АСР получила наибольшее распространение.

Достоинство схемы: регулируемая величина x постоянно находится под контролем.

Недостаток схемы: регулятор вступает в действие лишь после появления рассогласования между заданными значениями ($x_{зад}$) и действительным (x_1) регулируемой величины.

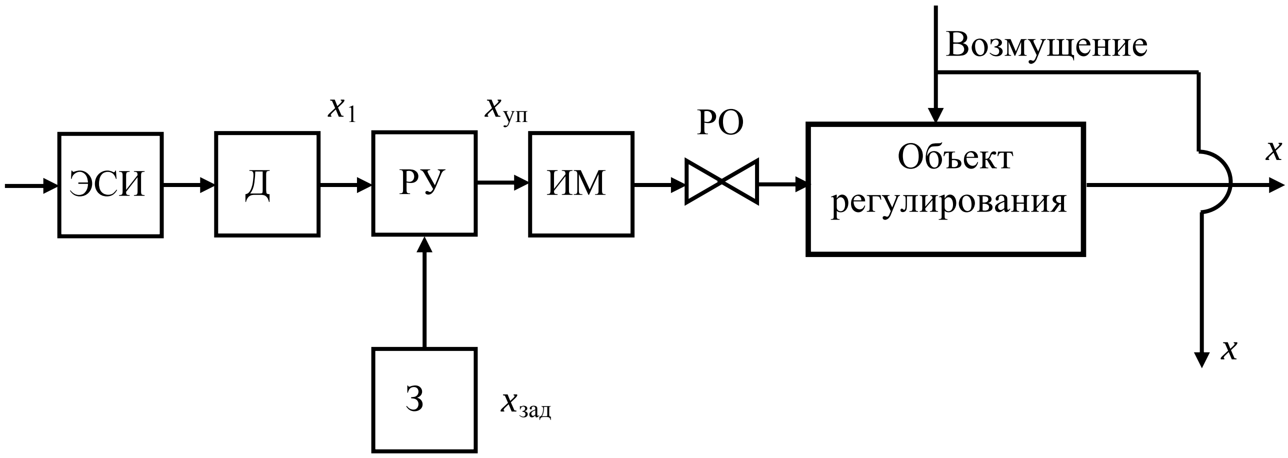
Таким образом, затруднено высокое качество регулирования.

- Схема с АСР по компенсации возмущения

В отличие от замкнутых систем АСР существуют разомкнутые системы, которые могут быть получены при устранении одной из связей контура. В рассматриваемом примере можно разомкнуть систему, перекрыв соединительную трубку регулятора.

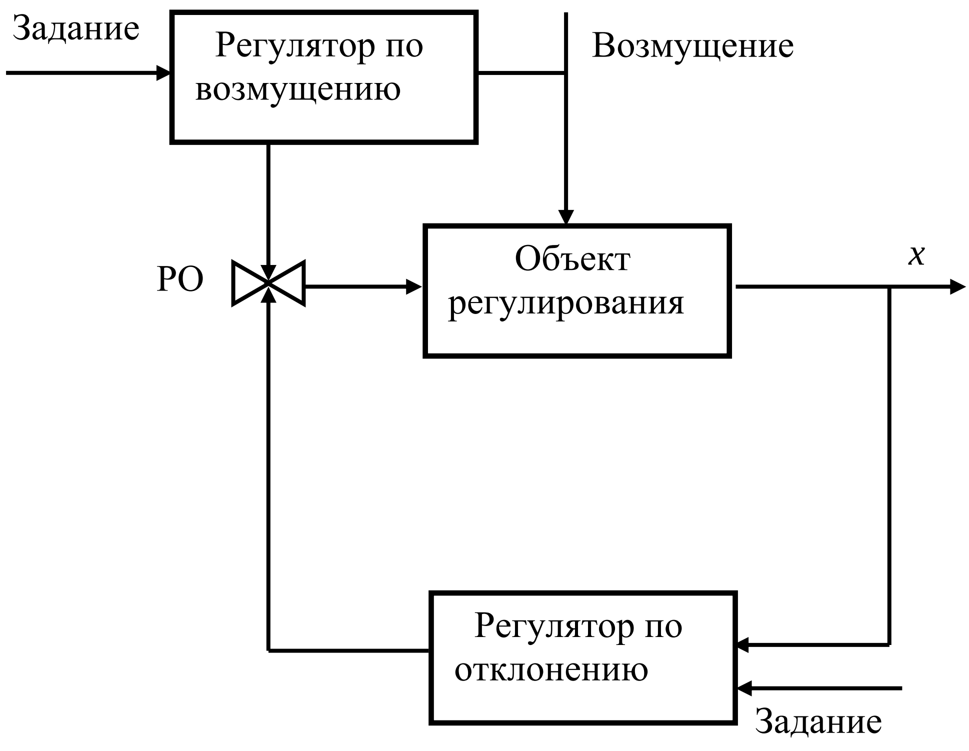
<u>Достоинство схемы:</u> обладает более высоким качеством регулирования, чем предыдущая АСР.

Недостаток схемы: регулированная величина может значительно отклониться от требуемого значения (из-за нерегулируемых возмущений).



ЭСИ – Элемент сравнения сигналов.

- Комбинированная АСР (лишена недостатков предыдущих двух схем)



Основные элементы автоматических систем:

1. Задающие элементы позволяют устанавливать предписанное значение выходной переменной объекта.
2. Чувствительные элементы предназначены для измерения выходной переменной или её отклонение от заданного значения.
3. Усилительные элементы служат для усиления сигнала полученного от чувствительного элемента.
4. Исполнительные элементы предназначены для создания управляющего воздействия на объект. В энергетике это, как правило, электродвигатели.
5. Преобразовательные элементы применяются в тех случаях, когда на выходе элемента надо получить величину отличающуюся от выходной, либо количественно, либо качественно.
6. Корректирующие и стабилизирующие устройства, служат для изменения динамических качеств системы или элементов. К таким элементам относятся дифференцирующие элементы или элементы обратных связей.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 3.

Классификация автоматических систем.

I. По закону изменения выходной переменной

1. Стабилизирующие – предписанное значение выходной переменной является неизменной)
2. Программные – выходная переменная изменяется по определенной заранее заданной программе.
3. Следящие – предписанное значение выходной переменной зависят от значения неизвестной заранее переменной на входе автоматической системы.

II. По характеру регулируемой физической величины

1. Напряжение.
2. Температура.
3. Давление и т.д.

III. По виду используемой для управления энергии

1. Гидравлические.
2. Пневматические.
3. Электрические.

IV. По характеру действующих в системе сигналов.

1. Дискретные.
2. Непрерывные.

V. По виду уравнения

1. Линейные.
2. Нелинейные.

VI. По стабильности параметров системы во времени

1. Нестационарные.
2. Стационарные.

VII. По количеству регулируемых и управляемых переменных

1. Одномерные.
2. Многомерные.

VIII. По свойствам приспосабливаться к изменению внешних условий работы

1. Обыкновенные.
2. Самонастраивающиеся.

Задачи теории автоматического управления (ТАУ)

Разработка и проектирование автоматических систем состоит из следующих этапов:

1. Изучения управляемого объекта.
2. Определение его характеристик, параметров условий его работы и воздействие, которые он испытывает.
3. Формирование требований предъявляемых к системе.
4. Выбор функциональной схемы.
5. Разработка принципиальной скорости.
6. Выбор и расчет элементов, а также параметров систем.
7. Исследование устойчивости системы.
8. При необходимости – выбор корректирующих и стабилизирующих устройств.
9. Исследование системы в лабораторных условиях или её моделирование, а также внесение коррективов в схему.
10. Наладка системы в реальных условиях.
11. Опытная эксплуатация автоматической системы.
12. Обобщение результатов эксплуатаций и составление рекомендаций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Моделирование – это исследование некоторого процесса при помощи модели.

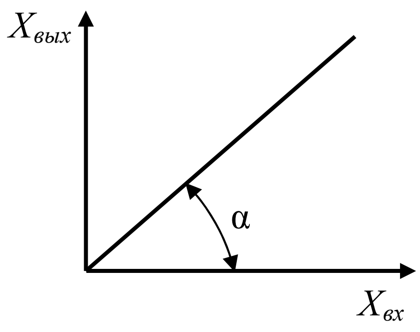
Моделью данного процесса является некоторый другой процесс, имеющий с данным общие свойства, что позволяет использовать модель для изучения моделируемого процесса.

Статические характеристики элементов

Статическая характеристика – это зависимость выходной величины от выходной.

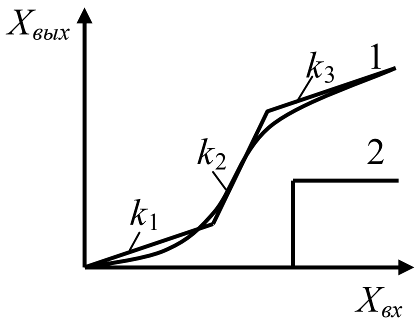
$X_{вых} = f(X_{вх})$ – если статическая характеристика линейная

$X_{вых} = k \cdot X_{вх}$, k = const – коэффициент усиления элемента, где $k = \dfrac{X_{вых}}{X_{вх}}$.



если статическая характеристика нелинейная $k(X_{вх}) = \dfrac{X_{вых}}{X_{вх}}$.

Для нелинейного элемента коэффициент усиления (передачи) k является переменной величиной, которая зависит от $X_{вх}$ или другой величины.



1 – непрерывная; 2 – ступенчатая

Линеаризация нелинейной статистической характеристики возможно, возможно только в том случае, если она непрерывна и имеет непрерывные изменения производной.

$$X_{вых} = f(X_{вх1}; X_{вх2}).$$

Статические характеристики автоматических систем

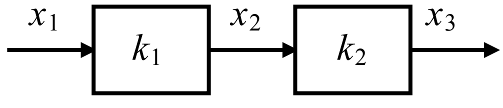
Статические характеристики обычно рассчитываются относительно постоянных внешних воздействий.

Элементы систем могут соединяться параллельно, последовательно или с обратной связью.

<u>Соединение элементов называется параллельным</u>, если на их входы одна и та же переменная, а выходные переменные всех элементов складываются.

<u>Соединение элементов называется последовательным</u>, если выходная переменная каждого предыдущего элемента является входной каждого последующего элемента.

<u>Последовательное соединение:</u>

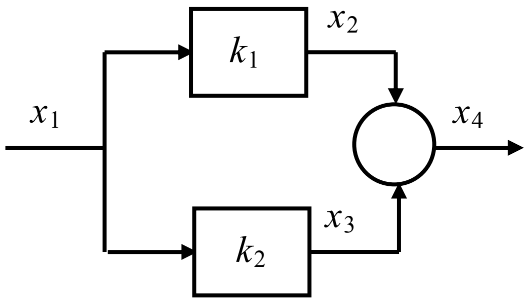


$$x_2 = k_1 \cdot x_1$$
$$x_3 = k_2 \cdot x_2$$
$$x_3 = f(x_1)$$
$$x_3 = k_1 \cdot k_2 \cdot x_1$$

если представить $K = k_1 \cdot k_2$.

В общем случае $K = \prod_{i=1}^{n} k_i$, n – количество элементов.

Последовательное соединение:



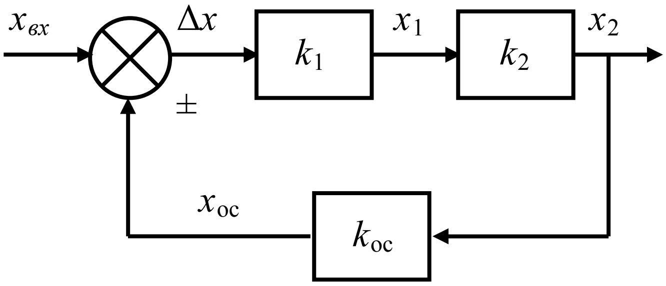
$$x_4 = x_2 + x_3 \text{, где } x_2 = k_1 \cdot x_1 \text{ и } x_3 = k_2 \cdot x_1$$

$$x_4 = f(x_1) \text{, тогда } x_4 = (k_1 + k_2) \cdot x_1$$

$$K = \sum_{i=1}^{n} k_i \,.$$

Если сигнал обратной связи, подаваемый на вход системы пропорционален только значению выходной переменной, то обратная связь называется жесткой.

Если же сигнал появляется не только при изменении выходной переменной, но и ее производных, то обратная связь называется гибкой.



$$\Delta x = x_{вх} \pm x_{ос}$$

$$x_1 = k_1 \cdot \Delta x;\; x_2 = k_2 \cdot x_1;\; x_{ос} = k_{ос} \cdot x_2$$

$x_2 = f(x_{вх})$; т.к. последовательное соединение (см. пример выше), то $x_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot \Delta x$; проведем ряд преобразований выразив x_2 через k_1, k_2, $x_{вх}$, $k_{ос}$.

$$x_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot (x_{вх} \pm k_{ос} \cdot x_2),$$

$$x_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot x_{вх} \pm k_1 \cdot k_2 \cdot k_{ос} \cdot x_2,$$

$$x_2 \pm k_1 \cdot k_2 \cdot k_{ос} \cdot x_2 = k_1 \cdot k_2 \cdot x_{вх};$$

$$x_2 = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot x_{вх}}{1 \pm k_1 \cdot k_2 \cdot k_{ос} \cdot x_2}.$$

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 4.

Существуют два способа получения математической модели динамического процесса:

1. Экспериментальный.
2. Аналитический.

В общем виде дифференциальные уравнения системы или объекта являются нелинейными. Уравнения всей системы можно получить, если привести все уравнения элементов к однородному виду.

$$F_1\left(x_{вых}, \dot{x}_{вых}, \ddot{x}_{вых} \ldots\right) = F_2\left(f, \dot{f}, \ddot{f} \ldots, x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх} \ldots\right).$$

Для линейных систем справедлив принцип суперпозиции.

$$F_1\left(x_{вых}, \dot{x}_{вых}, \ddot{x}_{вых} \ldots\right) = F_{21}\left(f, \dot{f}, \ddot{f}\right) + F_{22}\left(x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх} \ldots\right),$$

где $x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх} \ldots$ – это управляемая переменная и ее производные;

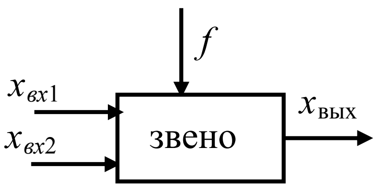
$f, \dot{f}, \ddot{f}$ – возмущающее воздействие и его производные;

$x_{вых}, \dot{x}_{вых}, \ddot{x}_{вых} \ldots$ – выходная переменная и ее производные.

Линеаризация уравнений

Звено может иметь несколько входных величин и обязательно выходную величину, кроме того, на звено может оказывать воздействие внешние возмущения.

Пример:



f – возмущение; $x_{вх1}$, $x_{вх2}$ – входные величины.

$$F\left(x_{вх1}, x_{вх2}, \dot{x}_{вх2}, x_{вых}, \dot{x}_{вых}, \ddot{x}_{вых}, \dddot{x}_{вых}\right) = \varphi\left(f, \dot{f}\right). \quad (1)$$

Допустим, что установившийся процесс в системе имеет место при некоторых постоянных значениях, а именно:

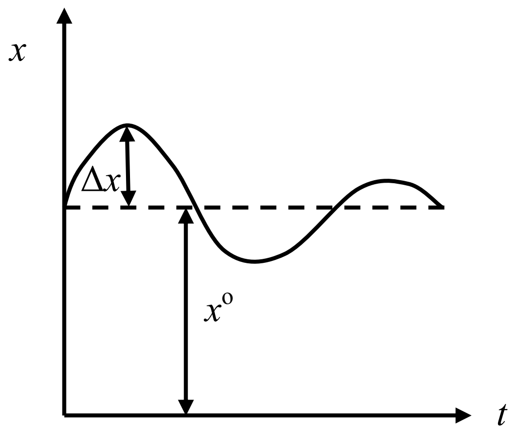
$$x_{вх1} = x^o_{вх1};\ x_{вх2} = x^o_{вх2};\ x_{вых} = x^o_{вых};\ f = f^o,$$

тогда, уравнение (1) установившегося состояния для данного звена запишется как:

$$F\left(x^o_{вх1}, x^o_{вх2}, 0, x^o_{вых}, 0, 0, 0\right) = \varphi\left(f^o, 0\right). \quad (2)$$

Уравнение (2) – уравнение статики.

В основе линеаризации уравнений лежит предположение о том, что в исследуемом динамическом процессе переменные $x_{вх1}$, $x_{вх2}$, $x_{вых}$ изменяются так, что их отклонение от установившегося значения $x^o_{вх1}, x^o_{вх2}, x^o_{вых}$ остаются все время достаточно малыми



Обозначим, указанное отклонение через $\Delta x_{вх1}$, $\Delta x_{вх2}$, $\Delta x_{вых}$, тогда в динамическом процессе можно записать:

$$\left.\begin{aligned}
&x_{вх1}(t) = x^o_{вх1} + \Delta x_{вх1}(t)\\
&x_{вх2}(t) = x^o_{вх2} + \Delta x_{вх2}(t)\\
&\dot{x}_{вх2} = \Delta\dot{x}_{вх2}(t)\\
&x_{вых}(t) = x^o_{вых} + \Delta x_{вых}(t)\\
&\dot{x}_{вых} = \Delta\dot{x}_{вых}(t)\\
&\ddot{x}_{вых} = \Delta\ddot{x}_{вых}(t)\\
&\dddot{x}_{вых} = \Delta\dddot{x}_{вых}(t)
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Условие достаточной малости динамической отклонение переменных от некоторых установившихся значений для систем автоматического регулирования обычно выполняется, этого требует идея работы АСР. Внешнее воздействие *f* не зависит от работы АСР и обычной линеаризации не подлежит, хотя в отельных случаях и она может быть линеаризована.

Разложим функцию *f*, стоящую в левой части уравнения (1) в ряд по степеням, указанных выше малых отклонений, рассматривая все производные как самостоятельные переменные, тогда уравнение (1) примет вид:

$$\begin{aligned}
&F\left(x^o_{вх1}, x^o_{вх2}, 0, x^o_{вых}, 0,0,0\right) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх1}}\right)^o \Delta x_{вх1} + \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх2}}\right)^o \Delta x_{вх2} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вх2}}\right)^o \Delta \dot{x}_{вх2} + \\
&+ \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o \Delta x_{вых} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \dot{x}_{вых} + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \ddot{x}_{вых} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dddot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \dddot{x}_{вых} + \\
&+ (\textit{членывысшего порядка малости}) = \varphi\left(f, \dot{f}\right)
\end{aligned} \tag{4}$$

где, например $\left(\dfrac{\partial F}{\partial x_{вх1}}\right)^o$ для краткости обозначена частная производная, которая взята при постоянных значениях $x^o_{вх1}, x^o_{вх2}, x^o_{вых}$ и все производные равны нулю.

Члены высшего порядка малости, указанные в уравнении (4) состоят из произведений и степеней малых отклонений $\Delta x_{вх1}$, $\Delta x_{вх2}$, $\Delta x_{вых}$… с коэффициентами в виде смешанных частных производных.

Вычтем из уравнения (4) почленно уравнение статики (2) и отбросим члены высшего порядка малости. Получим линеаризованное уравнение динамики данного звена:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх1}}\right)^o \Delta x_{вх1} + \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх2}}\right)^o \Delta x_{вх2} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вх2}}\right)^o \Delta \dot{x}_{вх2} + \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o \Delta x_{вых} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \dot{x}_{вых} +$$
$$+ \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \ddot{x}_{вых} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dddot{x}_{вых}}\right)^o \Delta \dddot{x}_{вых} = \varphi\left(f, \dot{f}\right) - \varphi\left(f^o, 0\right) \tag{5}$$

Дифференциальное уравнение (5) так же, как (1) описывает тот же динамический процесс в том же звене АСР. Отличие этого уравнения от прежнего состоит в следующем:

1. Уравнение является более приближенным, т.к. в процессе его вывода были отброшены малые высшего порядка.
2. Неизвестными функциями времени в этом уравнении является не прежние полные величины полные величины $x_{вх1}$, $x_{вх2}$, $x_{вых}$, а их отклонения $\Delta x_{вх1}$, $\Delta x_{вх2}$, $\Delta x_{вых}$ от некоторых установившихся значений $x^o_{вх1}, x^o_{вх2}, x^o_{вых}$.
3. Полученное уравнение является линейным относительно отклонений $\Delta x_{вх1}, \Delta x_{вх2}, \Delta \dot{x}_{вх2},, \Delta x_{вых}, \Delta \dot{x}_{вых}, \Delta \ddot{x}_{вых}, \Delta \dddot{x}_{вых}$ с постоянными коэффициентами $\left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх1}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх2}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вх2}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вых}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_{вых}}\right)^o, \left(\frac{\partial F}{\partial \dddot{x}_{вых}}\right)^o$.

Уравнение (5) называется <u>дифференциальным уравнением звена в отклонениях</u>.

Запись линеаризованных уравнений звеньев

В ТАУ дифференциальные уравнения записываются так, чтобы выходная величина и её производные находились в левой части уравнения, а входная величина и все остальные члены уравнения в правой части, кроме того, выходная величина входила в уравнение с коэффициентом «1».

Введем следующие обозначения (т.е. в уравнении (5) все члены содержащие частные производные разделим на следующий член $\left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o$):

$$\left.\begin{aligned}
k_1 &= -\left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх1}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
k_2 &= -\left(\frac{\partial F}{\partial x_{вх2}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
k_3 &= -\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вх2}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
k_4 &= -1 : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
T_1 &= \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{вых}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
T_2^2 &= \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_{вых}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
T_3^3 &= \left(\frac{\partial F}{\partial \dddot{x}_{вых}}\right)^o : \left(\frac{\partial F}{\partial x_{вых}}\right)^o;\\
f_1(t) &= \varphi(f, \dot{f}) - \varphi(f^o, 0)
\end{aligned}\right\} . \qquad (6)$$

С учетом введенных обозначений перепишем уравнение (5) в виде:

$$\Delta x_{вых} + T_1\Delta\dot{x}_{вых} + T_2^2\Delta\ddot{x}_{вых} + T_3^3\Delta\dddot{x}_{вых} = k_1\Delta x_{вх1} + k_2\Delta x_{вх2} + k_3\Delta\dot{x}_{вх2} + k_4 f_1(t). \qquad (7)$$

Уравнение (7) удобно записывать в символической форме, введя алгебраический оператор дифференцирования $P = \frac{\partial}{\partial t}$, т.о. можно записать $\Delta\dddot{x} = \Delta x\, p^3$, тогда уравнение (7) примет вид:

$$\left(T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1\right)\Delta x_{вых} = k_1\Delta x_{вх1} + \left(k_2 + k_3 p\right)\Delta x_{вх2} + k_4 f_1(t), \qquad (8)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты передачи, T_1, T_2, T_3 – постоянные времени.

Выразим $\Delta x_{вых}$, для этого в уравнение (8) разделим правую и левую часть на следующее выражение $\left(T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1\right)$, тогда получим:

$$\begin{aligned}
\Delta x_{вых}(t) = {} & \frac{k_1}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}\Delta x_{вх1}(t) + \frac{\left(k_2 + k_3 p\right)}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}\Delta x_{вх2}(t) + \\
& + \frac{k_4}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} f_1(t)
\end{aligned}.$$

Введем следующие обозначения:

$$W_1 = \frac{k_1}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},\ W_2 = \frac{k_2 + k_3 p}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},\ W_f = \frac{k_4}{T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

С учетом введенных обозначений получим

$$\Delta x_{вых}(t) = W_1\Delta x_{вх1}(t) + W_2\Delta x_{вх2}(t) + W_f f_1(t)$$

W_1, W_2, W_f – передаточные функции.

Преобразование Лапласа

Любой кусочно-непрерывной функции $f(t)$ возрастающей при $t\to\infty$, не быстрее, чем e^{ct}, где c=const, может быть представлена в соответствий её преобразования (или L-образ).

$$F(S)=\int_0^{\infty} e^{-St} f(t)dt, \qquad (*)$$

(*) – прямое преобразование Лапласа.

$$f(t)=\frac{1}{2\pi i}\int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(S)e^{St}dS, \qquad (**)$$

(**) – обратное преобразование Лапласа.

где S – оператор Лапласа (S=r+iσ – комплексной переменной).

Наименование, свойства	Оригинал	Изображения Лапласа
1. Свойство линейности	$A\cdot f(t)$; $f_1(t)+f_2(t)$	$A\cdot F(p)$; $F_1(p)+F_2(p)$
2. Теорема подобия	$f(at)$	$\frac{1}{a}\cdot F\left(\frac{p}{a}\right)$
3. Теорема запаздывания	$f(t-\tau_0)$	$e^{-\tau_0 p}\cdot F(p)$
4. Правила дифференцирования	$f^{(n)}(t)$	$p^n\cdot F(p)$
5. Правила интегрирования	$\iiint ... f(t)dt^n$	$\frac{F(p)}{p^n}$
6. Единичная импульсная функция	$\delta(t)$	1
7. Единичная ступенчатая функция	$1(t)$	$1/p$

$$\left(T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1\right)\Delta x_{вых} = k_1 \Delta x_{вх1} + \left(k_2 + k_3 p\right)\Delta x_{вх2} + k_4 f_1(t)$$

В качестве примера приведем изображение Лапласа к уравнению (8) используя правила дифференцирования:

$$\Delta \ddot{x}_{вых} \to \frac{d^2 \Delta x_{вых}}{dt^2} \to p^2 \cdot \Delta X_{вых}(p),$$

тогда уравнение (8) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} &T_3^3 \cdot p^3 \cdot \Delta X_{вых}(p) + T_2^2 \cdot p^2 \cdot \Delta X_{вых}(p) + T_1 \cdot p \cdot \Delta X_{вых}(p) + \Delta X_{вых}(p) = \\ &= k_1 \cdot \Delta X_{вх1}(p) + k_2 \cdot \Delta X_{вх2}(p) + k_3 \cdot p \cdot \Delta X_{вх2}(p) + k_4 F_1(p) \end{aligned}.$$

Преобразуем полученное выражение:

$$\Delta X_{вых}(p) \cdot \left(T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1\right) = k_1 \cdot \Delta X_{вх1}(p) + \Delta X_{вх2}(p) \cdot \left(k_2 + k_3 \cdot p\right) + k_4 F_1(p)$$

Аналогично, как было проделано выше, выразим из полученного выражения $\Delta X_{вых}(p)$:

$$\begin{aligned} \Delta X_{вых}(p) = &\frac{k_1 \Delta X_{вх1}(p)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1} + \\ &+ \frac{\Delta X_{вх2}(p) \cdot \left(k_2 + k_3 \cdot p\right)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1} + \frac{k_4 F_1(p)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1} \end{aligned}.$$

Введем обозначения:

$$W_1(p) = \frac{k_1 \Delta X_{вх1}(p)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1},$$

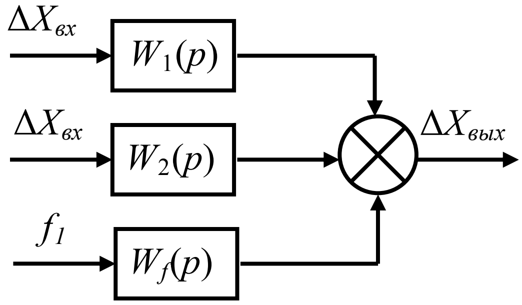
$$W_2(p) = \frac{\Delta X_{вх2}(p) \cdot \left(k_2 + k_3 \cdot p\right)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1},$$

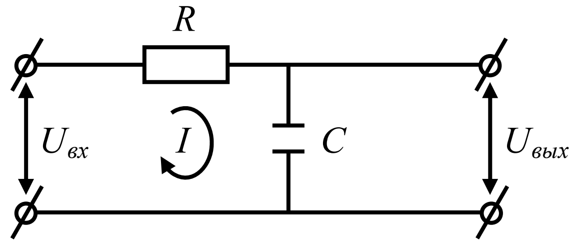
$$W_f(p) = \frac{k_4 F_1(p)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция – это есть отношение изображений выходной величины к изображению входной величины.

Обозначим $p = \dfrac{d}{dt}$ для символической записи дифференциальных уравнений, а также для записи уравнений с изображениями функции времени по Лапласу.

Однако в передаточных функциях буква «*p*» будет обозначать символ дифференцирования или комплексную величину, в зависимости от того, рассматривается ли функция времени или их изображение.





$$\left.\begin{array}{l} U_{вх} = U_R + U_C \\ U_{вых} = U_C \end{array}\right\} \Rightarrow U_{вх} = U_R + U_{вых}, \qquad (1)$$

$$U_R = J \cdot R, \qquad (2)$$

$$J = \frac{dq}{dt};\ q = C \cdot U_R = C \cdot U_{вых}.$$

$$\frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dU_{вых}}{dt} = J.$$

$$I = C \cdot \frac{dU_{вых}}{dt}. \qquad (3)$$

(2) и (3) → (1): $U_{вх}(t) = R \cdot C \cdot \frac{dU_{вых}(t)}{dt} + U_{вых}(t)$;

$$U_{вх}(p) = R \cdot C \cdot p \cdot U_{вых}(p) + U_{вых}(p);$$

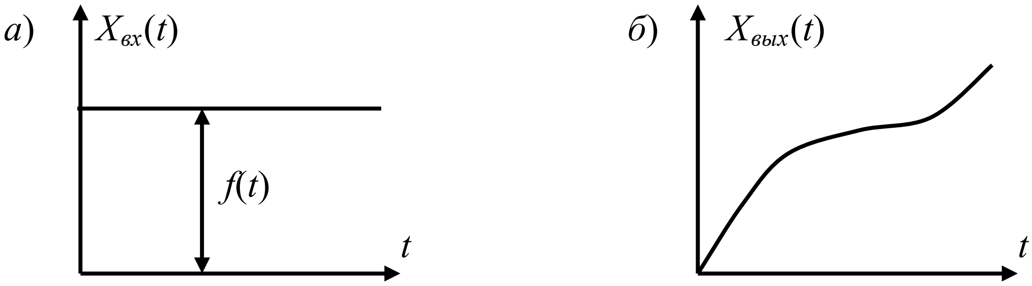
$$U_{вх}(p) = (R \cdot C \cdot p + 1) \cdot U_{вых}(p).$$

$$W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{1}{R \cdot C \cdot p + 1} = \frac{1}{T \cdot p + 1},\ \text{где } T = R \cdot C.$$

Временные характеристики системы

– это переходные и импульсные характеристики.

Переходная функция (или характеристика) представляет собой переходной процесс на выходе звена (системы), возникающий при подаче на его вход скачкообразного воздействия, при значении скачка = 1.

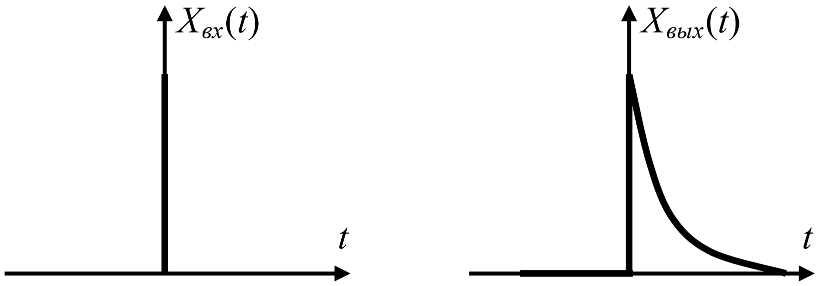


Такое ступенчатое воздействие (а) называют <u>единичной ступенчатой функцией</u>, для которой справедливо $X_{вх} = \begin{cases} 0, t \le 0 \\ 1(t) \end{cases}$.

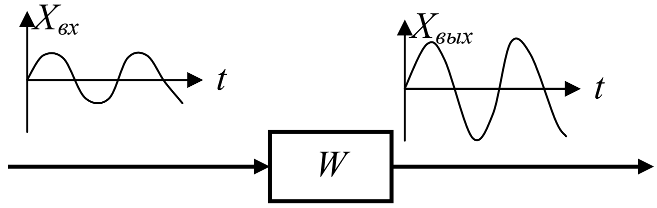
Если выходное воздействие представляет собой не единичную ступенчатую функцию

$X_{вх} = N \cdot 1(t)$, то $X_{вых} = N \cdot h(t)$, где h – переходная характеристика.

Также существует единичная импульсная функция (или дельта функция) $\delta(t)$ – тождественно равна нулю повсюду, кроме точки t=0, где она стремится в бесконечность.



Частотные характеристики звена



$$W(i\omega) = \text{Re}(\omega) + iJm(\omega)$$

реализ лежинализ

веществ. мнимая

ω – частота; i – мнимая единица, $i = \sqrt{-1}$.

$$W(i\omega) = A(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)};$$

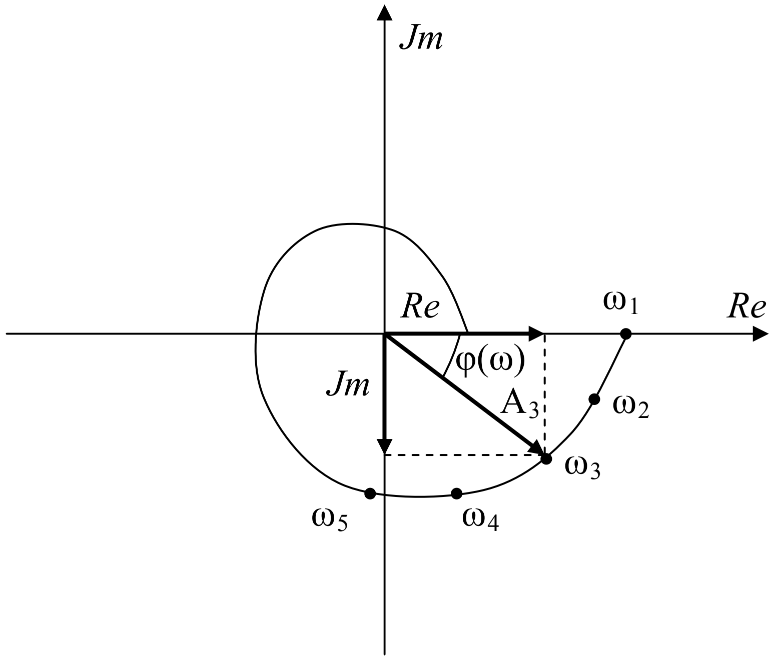
$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + Jm^2(\omega)};$$

$$\varphi(\omega) = arctg\,\frac{Jm}{\text{Re}}.$$

ВЧХ – вещественная частотная характеристика (Re(ω));

МЧХ – мнимая частотная характеристика (Jm(ω));

АЧХ – амплитудо-частотная характеристика ($A(\omega)$);
АФЧХ – амплитудо-фазочастотная характеристика (Re(Jm));



<u>Пример:</u> определение частотных характеристик

$$W(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1}, \text{ K и T = const}$$

Определить: ВЧХ, МЧХ, ФЧХ, АЧХ.

$$p = i \cdot \omega$$

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

$$W(i \cdot \omega) = \mathrm{Re}(i \cdot \omega) + iJm(\omega)$$

$$W(i \cdot \omega) = \frac{K(T \cdot i \cdot \omega - 1)}{(T \cdot i \cdot \omega + 1)(T \cdot i \cdot \omega - 1)} = \frac{K(T \cdot i \cdot \omega - 1)}{-T^2\omega^2 - 1} = \frac{K}{T^2\omega^2 + 1} - i\frac{K \cdot T \cdot \omega}{T^2\omega^2 + 1};$$

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

$$\varphi(\omega) = arctg\frac{Jm}{\mathrm{Re}} = arctg\left(-\frac{K \cdot T \cdot \omega}{T^2\omega^2 + 1} \cdot \frac{T^2\omega^2 + 1}{K}\right) = arctg(T \cdot \omega).$$

Типовые звенья и их характеристики

Для расчета различные АСР разбиваются на звенья.

<u>Под динамическим звеном</u> понимают устройство любого физического вида и конструктивного оформления, но описываемого определенным дифференциальным уравнением.

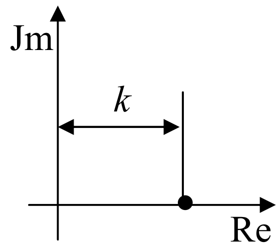
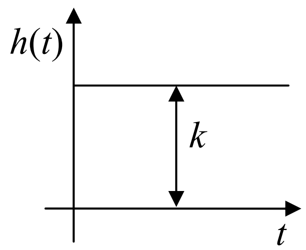
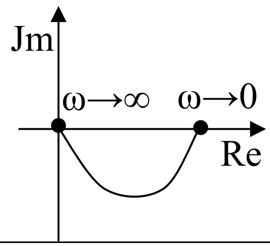
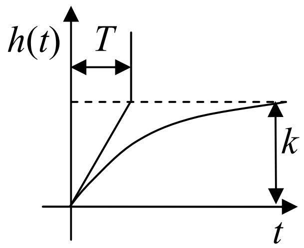
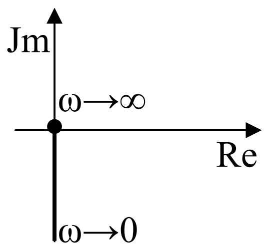
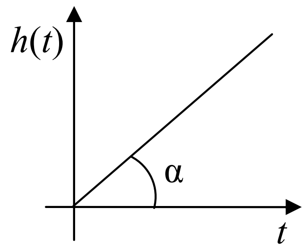
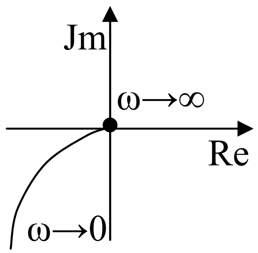
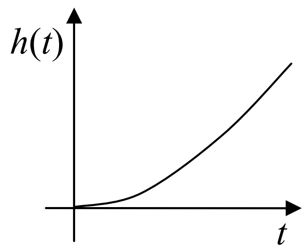
<u>Виды звеньев:</u>

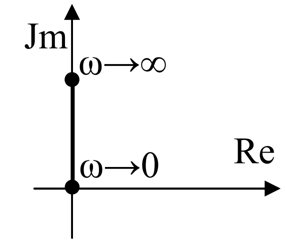
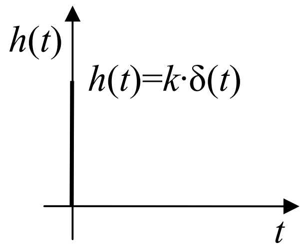
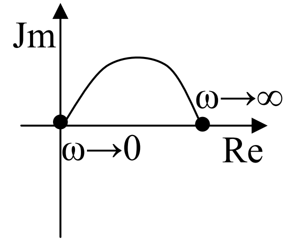
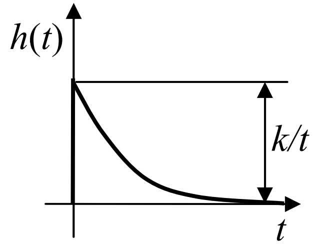
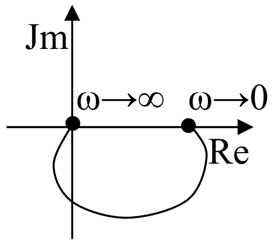
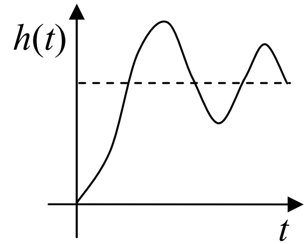
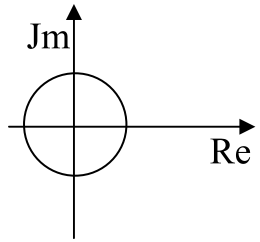
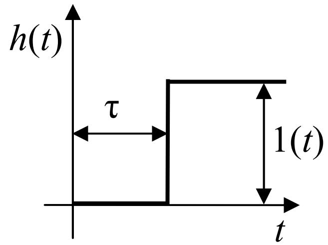
1. Усилительное звено.
2. Интегрирующее звено.

3. Дифференцирующее звено.
4. Апериодическое звено.
5. Колебательное звено.
6. Запаздывающее звено.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 6.

Тип звена	Диф. ур-е	Передатоная функция	АФЧХ	Переходная функция
1.Усилитель-ное	$x_{вых} = k \cdot x_{вх}$	$W(p) = k$		
2. Апериодичес-кое первого порядка	$T \cdot \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} = k \cdot x_{вх}$	$W(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1}$		
3. Идеальное интегрирующее	$\frac{dx_{вых}}{dt} = k \cdot x_{вх}$	$W(p) = \frac{k}{p}$		
4. Интегрирующая с замедлением	$T \cdot \frac{d^2 x_{вых}}{dt^2} + \frac{dx_{вых}}{dt} = k \cdot x_{вх}$	$W(p) = \frac{k}{T \cdot p^2 + 1}$		

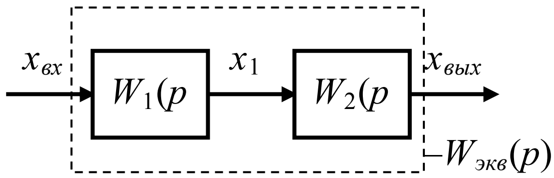
5. Идеальное дифференци-рующее	$x_{вых} = k \cdot \frac{dx_{вх}}{dt}$	$W(p) = kp$		
6. Дифференци-рующая с замедлением	$T \cdot \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} =$ $= k \cdot \frac{dx_{вх}}{dt}$	$W(p) = \frac{kp}{T \cdot p + 1}$		
7. Колебательная	$T_2^2 \cdot \frac{d^2 x_{вых}}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dx_{вых}}{dt} +$ $+ x_{вых} = k \cdot x_{вх}$	$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + Tp + 1}$		
8. Запаздывающая	$x_{вых} = x_{вх}(t - \tau)$	$W(p) = e^{-\tau p}$		

Типовые связи между звеньями в структурных схемах системы

Существуют три способа соединения звеньев АСР между собой

1. Последовательное соединение.
2. Параллельное соединение.
3. Встречно–параллельное (или обратная связь) соединение.

1. Такое соединение, когда выходная переменная каждого предыдущего звена является входным воздействием для последующего.

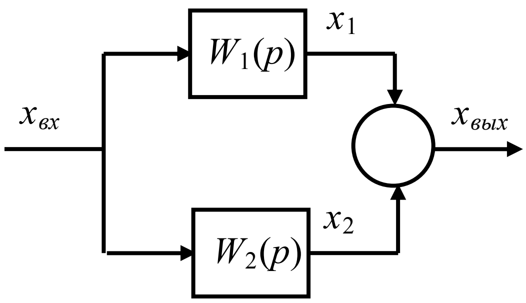


$$W_1(p)=\frac{x_1(p)}{x_{вх}(p)};\ W_2(p)=\frac{x_{вых}(p)}{x_1(p)}.$$

$$W_{экв}(p)=\frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)}=W_1(p)\cdot W_2(p).$$

$$W_{сист}^{экв}=\prod_{i=1}^{n}W_i(p).$$

2. Параллельное соединение – это такое звеньев, при котором один и тот же входной сигнал подается на вход двух или более звеньев, при этом значение выходных величин суммируется.



$$W_1(p)=\frac{x_1(p)}{x_{вх}(p)};\ W_2(p)=\frac{x_2(p)}{x_{вх}(p)}.$$

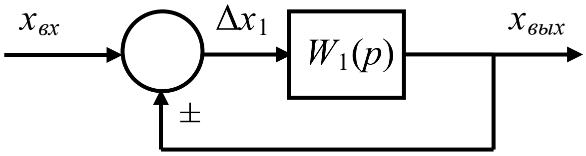
$$W_{экв}(p)=\frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)}=\frac{W_1x_{вх}+W_2x_{вх}}{x_{вх}}.$$

$$x_{вых}(p)=x_1(p)+x_2(p).$$

$$W_{экв}(p)=W_1(p)+W_2(p)=\sum_{i=1}^{n}W_i(p).$$

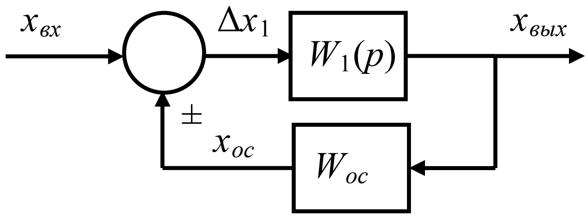
n – количество параллельно соединенных звеньев.

3. Встречно-параллельное – это соединение звеньев, при котором на вход звена одновременно с выходной величиной подается ее выходная величина последняя может передаваться через звено обратной связи.



$$W_1(p) = \frac{x_{вых}(p)}{\Delta x_1(p)}; \; W_1(p) = x_{вх} \pm x_{вых};$$

$$W_{экв}(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)}.$$



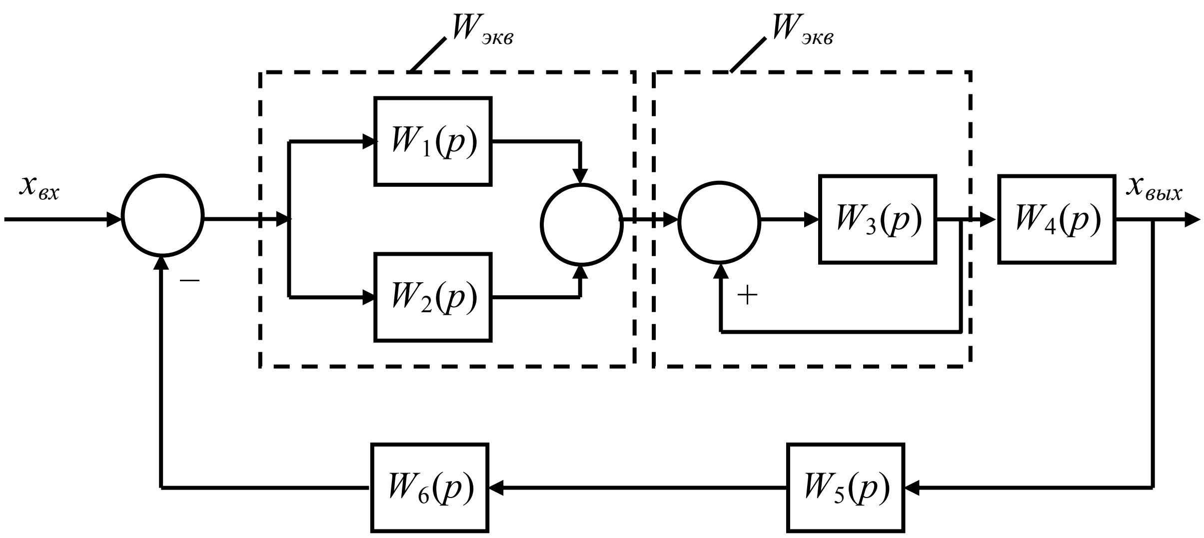
$$\Delta W_{ос} = \frac{x_{ос}}{x_{вых}};$$

$$\Delta x_1 = x_{вх} \mp x_{ос};$$

$$\Delta W_1(p) = \frac{x_{вых}}{\Delta x_1};$$

$$\Delta W_1(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{W_1 \cdot \Delta x_1}{\Delta x_1 \mp x_{ос}} = \frac{W_1 \cdot \Delta x_1}{\Delta x_1 \mp W_{ос} \cdot x_{вых}} = \frac{W_1 \cdot \Delta x_1}{\Delta x_1 \mp W_{ос}\left(W_1 \cdot \Delta x_1\right)},$$

Окончательно: $\Delta W_1(p) = \dfrac{W_1}{1 \pm W_1 \cdot W_{ос}}$.



$$W_{экв} = \frac{\left(W_1 + W_2\right) \cdot \dfrac{W_3}{1 + W_3} \cdot W_4}{1 + \left[\left(W_1 + W_2\right) \cdot \dfrac{W_3}{1 + W_3} \cdot W_4\right] \cdot W_5 \cdot W_6}.$$

Одноконтурными – называются такие структурные схемы, в которых звенья соединены между собой связями, образующими только один контур. В таких схемах сигнал возникающий в какой-либо точке проходит через все звенья и возвращается в туже точку только по одному пути.

Одноконтурные схемы имеют только одну главную обратную связь, которая соединяет выход со входом.

Схемы, содержащие не только главную обратную связь, но также и дополнительные прямые или обратные называются многоконтурными.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 7.

Автоматические регуляторы и их характеристики

Автоматический регулятор – совокупность устройств при помощи которых автоматически поддерживается регулируемая величина на заданном значении с той или иной точностью.

Регуляторы разделяются по

- роду действия;
- сложности;
- виду используемой энергии;
- устройству;

К автоматическим регуляторам предъявляются жесткие требования:

1. Простота устройства.
2. Надежность в работе.
3. Возможность объединения отдельных.
4. Обеспечение высокого качества регулирования.
5. Обеспечение высокой скорости действия;
6. Пажаро- и взрывобезопасность.

По роду действия регуляторы могут быть: прямого и непрямого действия.

Регуляторы прямого действия – у которых для изменения степени открытия регулируемого органа используется работа, совершаемая измерительным устройством, при изменении регулируемой величины.

Эти регуляторы не требуют посторонних источников энергии. Применяются в случае, когда не нужны большие усилия для перемещения регулирующего органа (утюг).

Регуляторы непрямого действия – у которых изменения степени открытия регулирующего органа осуществляется с помощью с помощью вспомогательного привода, работающего на энергии, подводимой из вне.

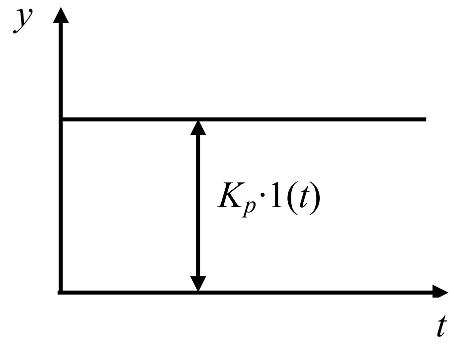
Основным свойством регулятора является осуществляемый им закон регулирования или вид зависимости между изменением регулируемой величины (входной величины) $u_{вх}$, регулирующим воздействием (выходной величины регулятора).

Наибольшее распространение получили регуляторы:

1. Пропорциональные (П – регулятор).
2. Интегральные (И – регулятор).
3. Пропорционально – интегральный (ПИ – регулятор).
4. Пропорционально – дифференциальный (ПД – регулятор).
5. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД – регулятор).

Законы регулирования:

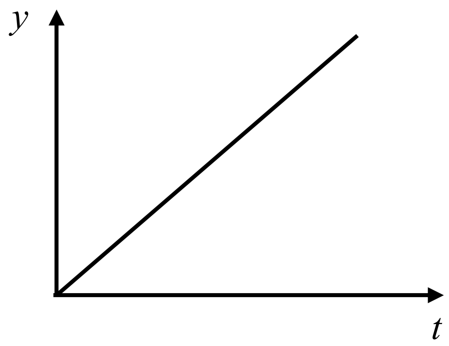
1. **П–регулятор** – такие регуляторы у которых, регулирующее воздействие пропорционально отклонению регулируемой величины.



$$W_p(p) = K_p,\ K_p = const.$$

"+" – высокое быстродействие;
"–" – возможность наличия статической ошибки регулирования.

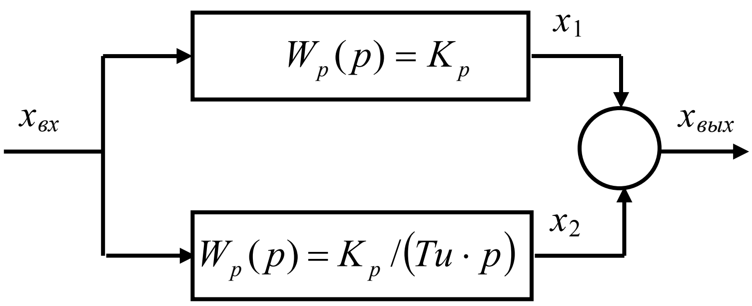
2. **П–регулятор** – у которых регулирующее воздействие пропорционально интегралу отклонения регулирующей величины.



$$W_p(p) = \frac{1}{Tu \cdot p},\ Tu = const.$$

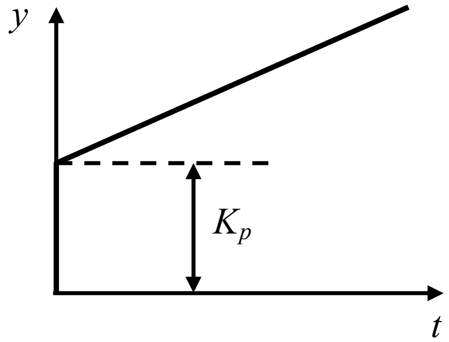
"+" – высокая точность.
"–" – нужное быстродействие.

3. **ПИ – регулятор**



$$W_p(p) = K_p + \frac{K_p}{Tu \cdot p},$$ (звенья включены параллельно).

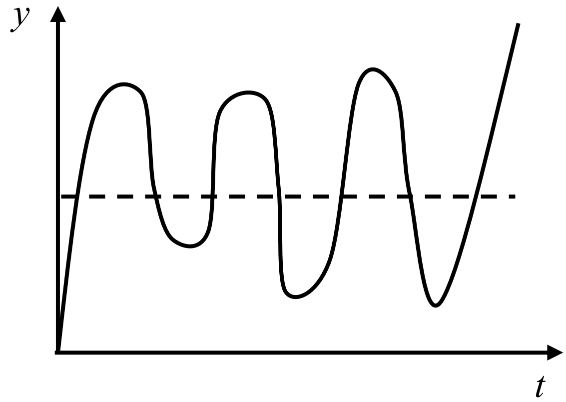
ПИ – регулирование сочетает в себе высокую точность И–регулятора с большим быстродействием П–регулятора.

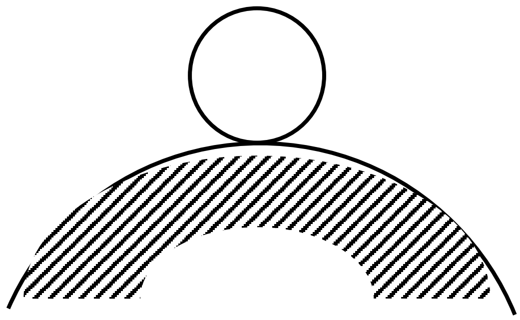


Устойчивость линеаризованных систем

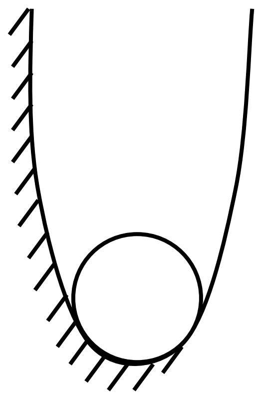
Основной характеристикой АСР является ее устойчивость. В зависимости от характеристик переходного процесса линеаризованной системы, различают три случая поведения системы.

1. Система не может восстановить равновесное состояние, значение управляемой переменной все больше отклоняется от заданной, переходный процесс называется расходящимся, а система неустойчива.

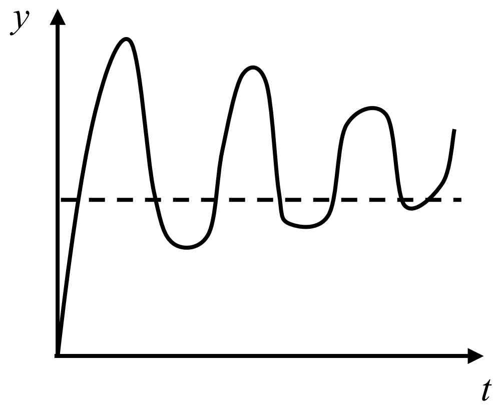


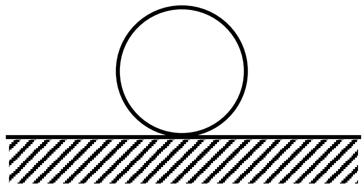


2. Система возвращается к равновесному состоянию, значение управляемой переменной отличается на величину статической ошибки, такие системы называются устойчивыми.



3. Система характеризуется установившемся периодическим движением. Процесс называется незатухающим, а о системе говорят что она находится на границе устойчивости.





Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 8.

Методы определения устойчивости

Устойчивость линейных (линеаризованных) систем не зависит от величины возмущения.

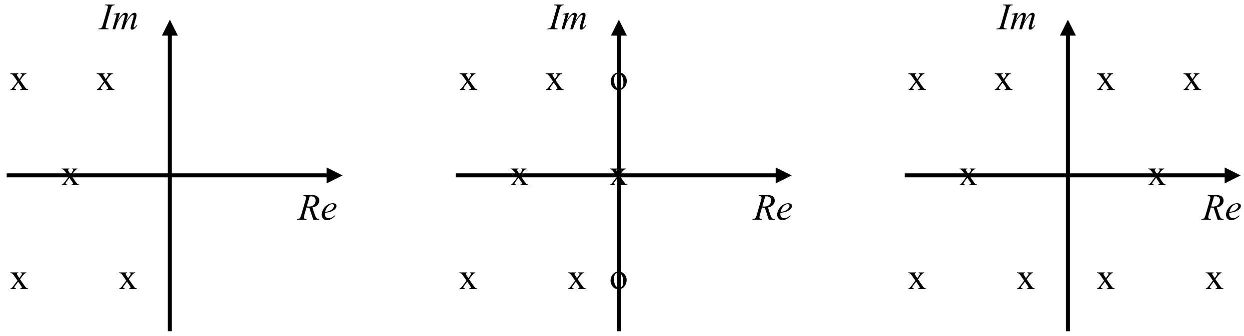
Система, устойчивая при малых возмущениях, будет устойчива и при больших возмущениях, поэтому для суждения об устойчивости линейных систем достаточно исследовать и определить устойчивость «в малом», т.е. найти устойчивость по уравнениям в форме приращений.

Для линеаризованных линейных систем справедлива 1–я теорема Ляпунова:

I. Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет все корни с отрицательными вещественными частями, то действительная система устойчива, при этом никакие члены высшего порядка малости отброшенные при линеаризации не могут изменить устойчивость системы.

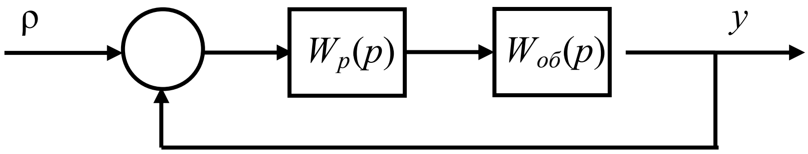
II. Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один корень с положительной вещественной частью, то действительные система неустойчивая, при этом никакие члены высшего порядка малости, отброшены при линеаризации не могут придать системе устойчивость.

III. Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один нулевой корень, или пару чисто мнимых сопряженных корней, то поведение действительной системы не может определятся ее линеаризованным уравнением, при этом отброшенные члены высшего порядка малости коренным образом изменяют описание динамического процесса реальной системы.



устойчивая   система на границе устойчивости   неустойчива

Пример:



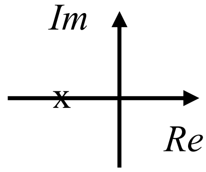
$$W_p(p) = K_p = 5;$$

$$W_{об}(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1}, \text{ где } K = 1,\ T = 10.$$

$$W_{sy}(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{об}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{об}(p)} = \frac{K_p \cdot \frac{K}{T \cdot p + 1}}{1 + K_p \cdot \frac{K}{T \cdot p + 1}} = \frac{K_p \cdot K}{T \cdot p + 1 + K_p \cdot K}.$$

$T \cdot p + 1 + K_p \cdot K = 0$ – характеристическое уравнение.

$$10 \cdot p + 1 + 5 = 0,$$
$$10 \cdot p = -6,$$
$$p = -0.6 + i \cdot 0.$$
$$\mathrm{Re} = 0.6,\ \mathrm{Im} = 0.$$



Вывод: система устойчива!

Для суждения об устойчивости линейных систем надо определить расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, при этом нет необходимости вычислять сами корни уравнения, надо только выяснить, все ли корни расположены слева от мнимой оси.

Математическая формулировка условий, которыми должны удовлетворять коэффициенты характеристического уравнения или какой-либо функции этих коэффициентов, чтобы система была устойчивой, называется критерием устойчивости.

Критерии устойчивости делятся на алгебраические и частотные.

Критерий позволяет вычислить все ли корни характеристического уравнения замкнутой системы находится в левой полуплоскости без решения этого уравнения. При этом для исследования устойчивости замкнутой системы, в зависимости от критерия устойчивости, требуется рассчитать характеристическое уравнение либо замкнутой системы, либо разомкнутой системы и ее частотные характеристики.

Необходимым условием устойчивости линейной системы любого порядка является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения этой системы.

Необходимое условие устойчивости является достаточным условием только для систем первого и второго порядков.

Алгебраический критерий устойчивости

Позволяет по коэффициентам характеристического уравнения замкнутой системы определить все ли корни являются левыми без решения этого уравнения. Наибольшее распространение получили:

- Критерий РАУСА
- Критерий ГУРВИЦА.

Критерий Гурвица:

Гурвиц разработал алгебраический критерий в форме определителей, которые составляются по коэффициентами характеристического уравнения замкнутой системы. Используя коэффициенты этого уравнения составляется главный определитель Гурвица. Для этого все коэффициенты начиная с коэффициента при n^{-1} производной выписываются последовательно до свободного члена по главной диагонали. Столбцы вверх от главной диагонали дополняют коэффициенты с убывающими индексами, а столбцы вниз коэффициентами с возрастающими индексами. Места которые должны быть заняты коэффициентами с индексами выше a_n и ниже a_0 заполняются нулями.

Характеристическое уравнение вида:

$$a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + a_{n-2} \cdot p^{n-2} + \ldots + a_1 \cdot p + a_0 = 0 .$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \ldots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \ldots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & a_0 \end{vmatrix} .$$

Δ_1, Δ_2, Δ_3

Для этого, чтобы характеристическое уравнение замкнутой системы имело все корни с отрицательной вещественной частью, главный определитель Гурвица, а также все его диагональные миноры (Δ_1, Δ_2, Δ_3,…) должны иметь один знак с a_0.

Пример:

$$\begin{array}{ccccc} a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & a_0 \\ 5p^4 & +3p^3 & +7p^2 & +8p & +1=0 \\ a_4 & a_3 & a_2 & a_4 & a_0 \end{array}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 3 & 8 & 0 & 0 \\ 5 & 7 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 8 & 0 \\ 0 & 5 & 7 & 1 \end{vmatrix};$$

$\Delta_1 = 3$,

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 8 \\ 5 & 7 \end{vmatrix} = 21 - 40 = -19$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 8 & 0 \\ 5 & 7 & 1 \\ 0 & 3 & 8 \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} 7 & 1 \\ 3 & 8 \end{vmatrix} + 5 \cdot (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 3 & 8 \end{vmatrix} \leq 0;$$

$$\Delta_4 = a_0 \cdot \Delta_3 = 1$$

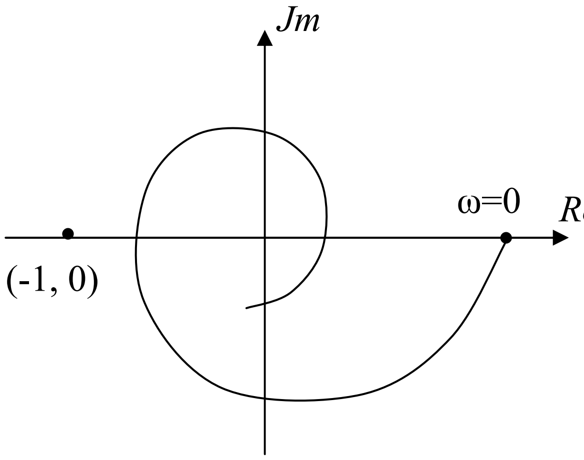
Вывод: система не устойчива, т.к. есть миноры меньше нуля.

Частотные критерии устойчивости

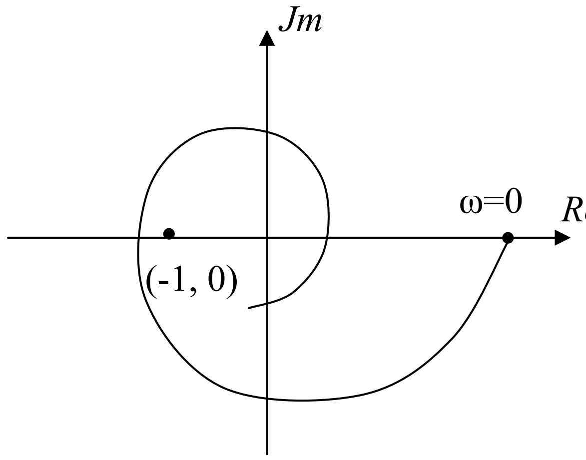
Имеются графоаналитические и обеспечивают наглядность инженерных расчетов. К частотным критериям относятся: Критерий Найквиста и критерий Михайлова.

Критерий Найквиста
(основан на анализе АФЧХ разомкнутой системы)

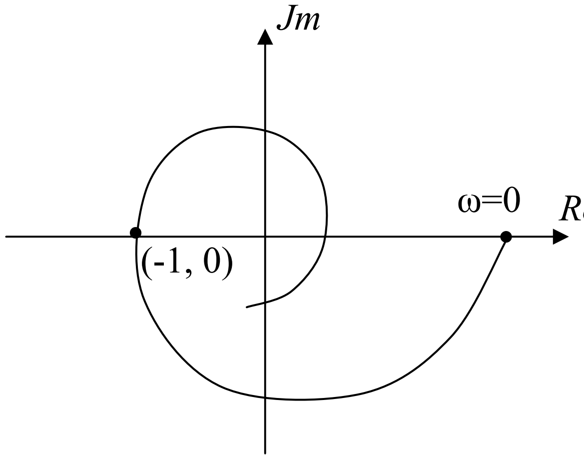
Если система устойчива в разомкнутом состоянии, то для устойчивости соответствующей замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы для $\omega \in (0, \infty)$ не охватывало точку с коэффициентами $(-1, 0)$. Если система является астатическое, т.е. содержит интегрирующее звено, то для применимости критерия Найквиста необходимо дополнить АФЧХ дугой бесконечно большого радиуса и определить ее расположение относительно точки $(-1, 0)$]



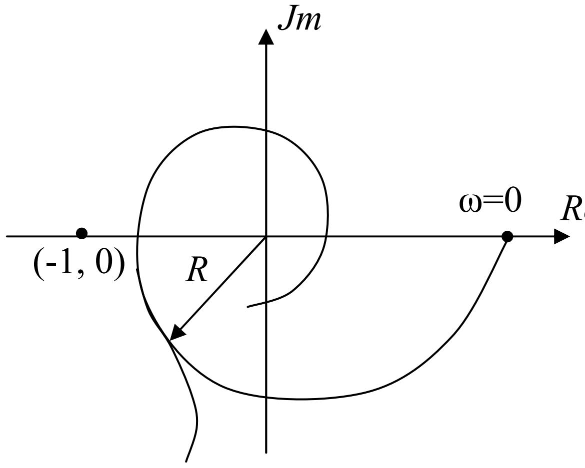
система устойчива



система неустойчива



система на границе устойчивости

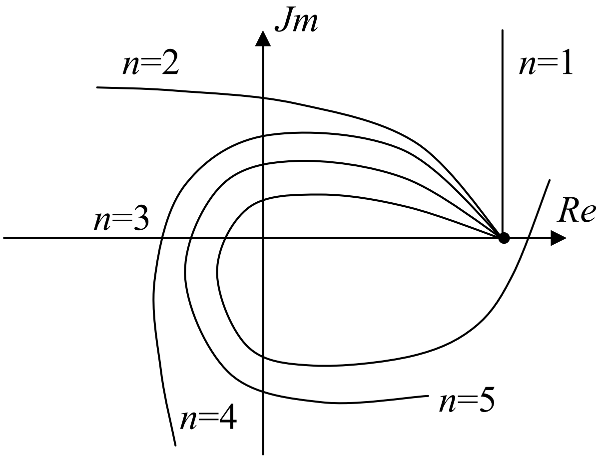


система устойчива

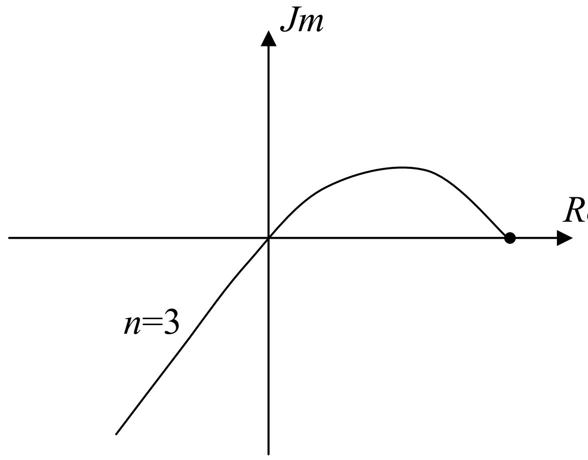
Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 9.

Критерий Михайлова
(Основан на анализе характеристического уравнения замкнутой системы)

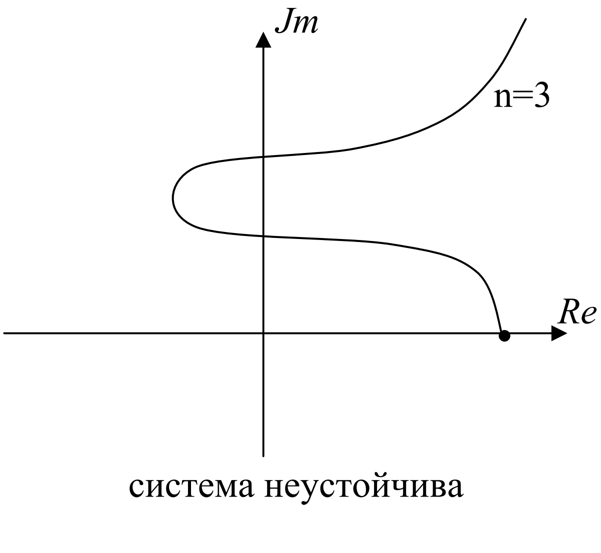
Автоматическая система будет устойчива, если при $\omega \in (0,\infty)$ вектор характеристического уравнения замкнутой системы начав движение от вещественной оси комплексной плоскости, вращаясь против часовой стрелки и нигде не обращаясь в ноль, обходит последовательно *n* – квадрантов, где *n* – степень полинома характеристического уравнения.



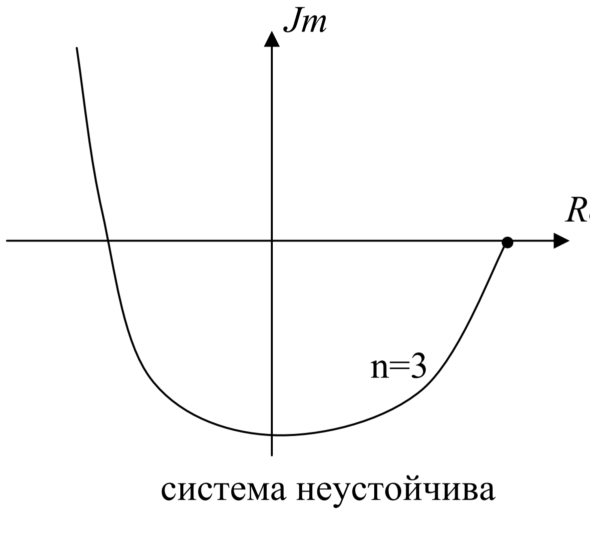
система устойчива



система на границе устойчивости



система неустойчива



система неустойчива

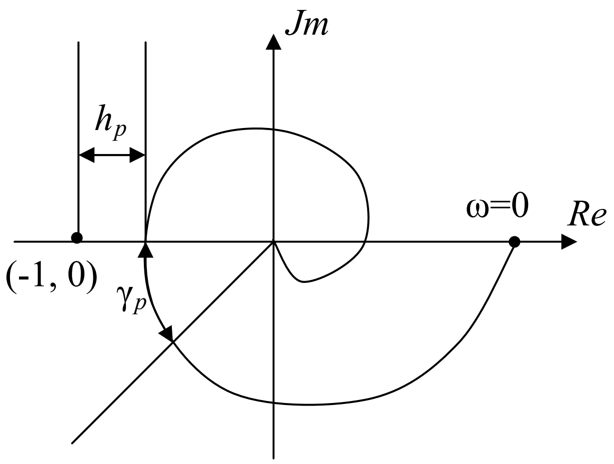
Оценка запаса устойчивости АСР

Определенный запас устойчивости системы необходим по следующим причинам:

1. При составлении уравнений звеньев автоматической системы допускается некоторая идеализация реального явления, в нем берется только самое главное и отбрасывается второстепенное.
2. При линеаризации уравнения оно становится еще более приближенным.

3. При использовании экспериментально снятых характеристик неизбежны большие погрешности в методике эксперимента, в технике его проведения и обработке результатов.
4. В серии систем управления, имеющих одинаковую структурную схему параметры однотипных образцов не могут быть совершенно одинаковыми, всегда имеется случайный разброс параметров вследствие технологических допусков на изготовлении деталей и других причин.
5. В процессе работы каждой системы возможно изменение параметров, имеющие случайный характер (температурные изменения, деформации и т.д.).

Запас устойчивости предусматривает некоторое удаление расчетных параметров системы от значений, соответствующих границе устойчивости. Этот запас устойчивости обеспечивает работу реальной системы в области в области устойчивости с заданным параметром переходного процесса



$\gamma_p \in \left[30^o; 60^o\right]$ – по фазе.

$h_p \geq 0,2...0,4$ – запас устойчивости по модулю.

Построение переходного процесса

Метод трапецеидальных вещественных частотных характеристик:

Переходный процесс при единичном воздействии при нулевых начальных условиях можно получить вычислив интеграл:

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\mathrm{Re}(\omega)}{\omega}\cdot\sin(\omega t)d\omega. \qquad (*)$$

Вычислив данный интеграл аналитически сложно, поэтому прибегают к приближенному способу, который основан на аппроксимации ЧХ несколькими линейными участками; затем ВЧХ представляют в виде суммы типовых трапеций; для каждой из трапеций по таблицам Солодовникова строят кривые применяя свойства ВЧХ.

Трапецеидальная характеристика определяется высотой Re(0), ω=0, а также интервалом равномерного пропускания ω_d, и интервалом положительностью ω_c.

Из ω_d и ω_c вычисляют наклон трапеции $x=\omega_d/\omega_c$. В интервале частот $0…\omega_d$, $\mathrm{Re}_1(\omega)=\mathrm{Re}(0)=const$. На участке $\omega_d…\omega_c$ Re изменяется по линейному закону:

$$\mathrm{Re}_2(\omega) = \mathrm{Re}(0)\cdot\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c - \omega_d}.$$

Для участка ω>ω_c → $\mathrm{Re}_3(\omega)=0$.

На основании свойств ВЧХ можно записать:

$$\mathrm{Re}_{сум}(\omega) = \mathrm{Re}_1(\omega) + \mathrm{Re}_2(\omega) + \mathrm{Re}_3(\omega) = = \mathrm{Re}(0) + \mathrm{Re}(0)\cdot\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c - \omega_d} \qquad (1)$$

Подставим выражение (1) в (*) получим:

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\mathrm{Re}(0)\int_0^{\omega_d}\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega + \frac{2}{\pi}\mathrm{Re}(0)\int_{\omega_c}^{\omega_d}\frac{\omega_c - \omega}{\omega_c - \omega_d}\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega.$$

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\mathrm{Re}(0)\cdot\left[S_i(\omega_d t) + \left(\frac{\omega_c}{\omega_c + \omega_d}\right)\cdot\left(S_i(\omega_c t) - S_i(\omega_d t)\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\omega_c - \omega_d}\left(\frac{\cos(\omega_c t) - \cos(\omega_d t)}{t}\right)\right].$$

Для упрощения последующих вычислений и составление универсальных таблиц (h) Солодовникова принимают $\mathrm{Re}(0) = 1$, ω_c=1, т.е.вводится понятие единичной ВЧХ единичной трапеции, для которой:

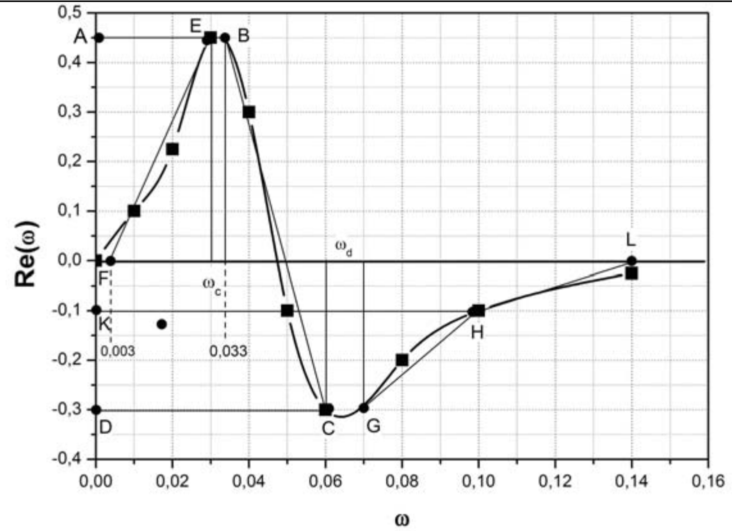
$$h(t) = \frac{2}{\pi}\mathrm{Re}(0)\cdot\left[S_i(x\tau) + \frac{1}{1-x}\cdot\left(S_i(\tau) - S_i(x\tau)\right) + \frac{\cos(\tau) - \cos(x\tau)}{\tau}\right]. \qquad (2)$$

$$\tau = \omega_c \cdot t$$

По уравнению (2) составлены типовые универсальные таблице для различных значений x.

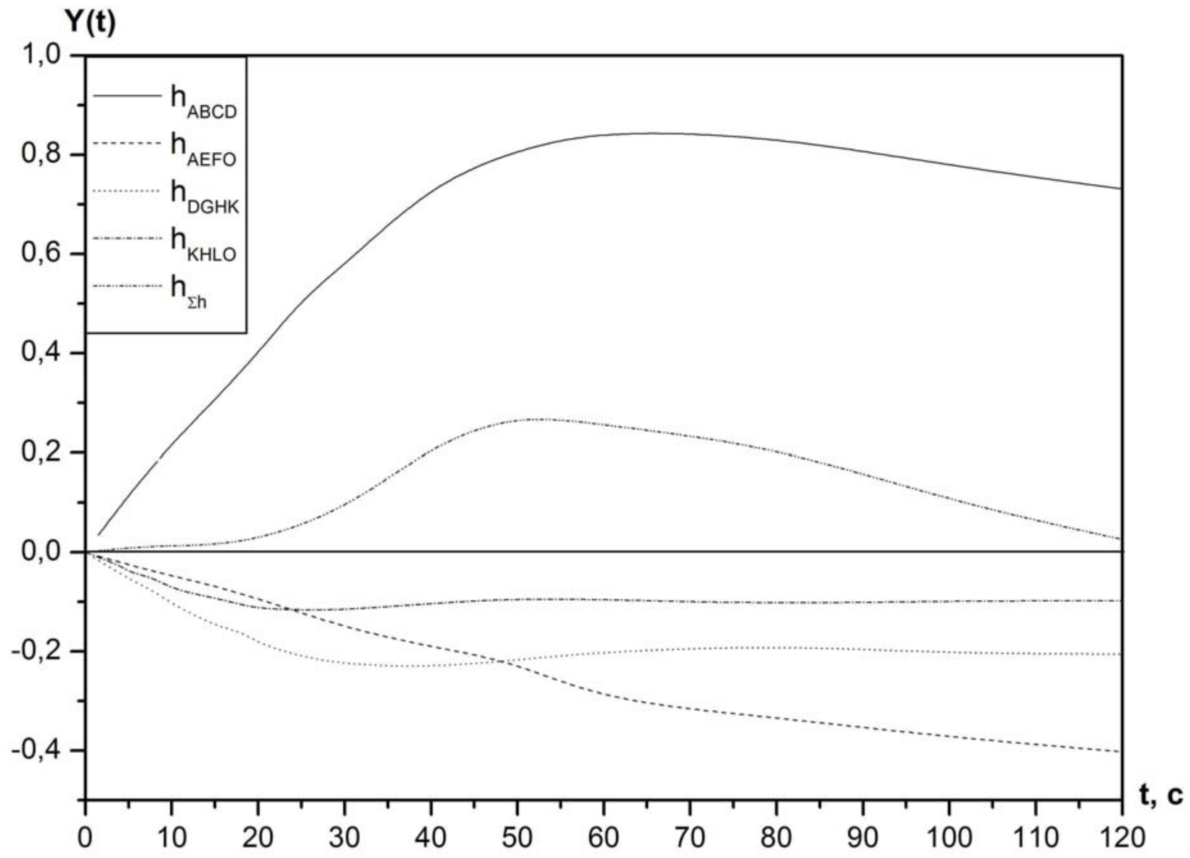
τ \ x	0	0,05	0,1	…	0,8	…	1
0	0	0	0	…	0	…	0
0,5	0,138	0,165	0,176	…	0,282	…	0,314
1	0,310	0,326	0,340	…	0,547	…	0,603
1,5	0,449	0,469	0,494	…	0,776	…	0,844
2	…	…	…	…	…	…	…
26	0,975	1,005	1,007	…	1,002	…	0,983

ω	Re
0	0
0,01	0,100
0,02	0,225
0,03	0,450
0,04	0,300
0,05	-0,100
0,06	-0,300
0,08	-0,200
0,10	-0,100
0,14	-0,025



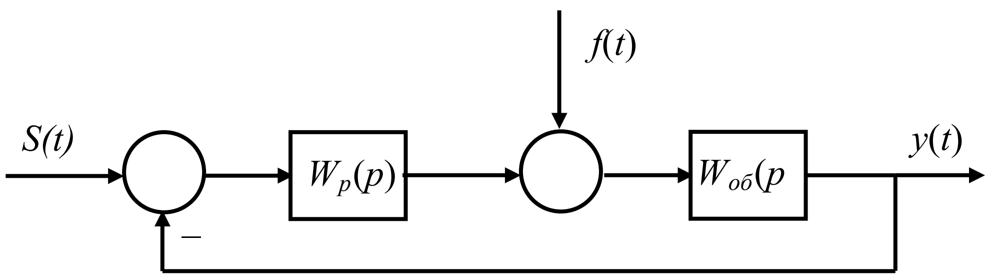
Трапеция	высота трапеции Re(0)	интервал равном. проп. ω_c	ω_d	$\chi=\omega_c/\omega_d$
ABCD	0,750	0,033	0,060	0,550
AEFO	-0,450	0,003	0,030	0,100
DGHK	-0,200	0,070	0,100	0,700
KHLO	-0,100	0,100	0,140	0,714

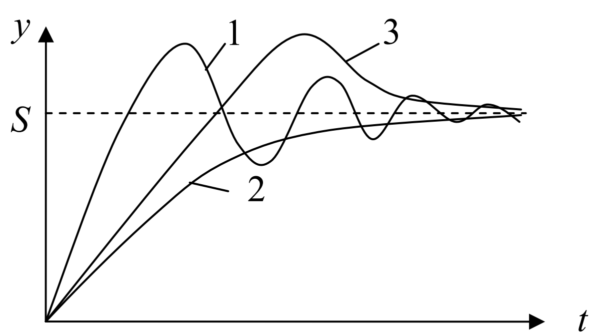
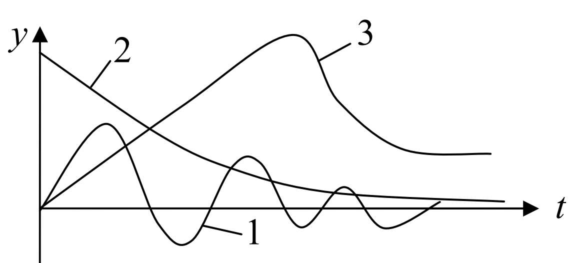
Время t, с	Трапеция ABCD $\chi=\omega_c/\omega_d=0,55$; Re(0)=0,75		Трапеция AEFO $\chi=\omega_c/\omega_d=0,1$; Re(0)=-0,45		Трапеция DGHK $\chi=\omega_c/\omega_d=0,7$; Re(0)=-0,2		Трапеция AEFO $\chi=\omega_c/\omega_d=0,714$; Re(0)=-0,1		H
	$\tau=\omega_d\cdot t=0,06t$	$h_1=h_\chi\cdot Re(0)$	**$\tau=\omega_d\cdot t=0,03t$**	$h_2=h_\chi\cdot Re(0)$	**$\tau=\omega_d\cdot t=0,1t$**	$h_3=h_\chi\cdot Re(0)$	**$\tau=\omega_d\cdot t=0,14t$**	$h_4=h_\chi\cdot Re(0)$	Σh
0	0	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0
4	-	-	-	-	0,40	-	0,56	-0,026	-
5	-	-	-	-	0,50	-0,054	0,70	-0,040	-
8	0,48	0,186	0,24	-0,040	0,80	-0,079	1,12	-0,052	0,015
10	0,60	-	0,30	-	1,00	-0,104	1,40	-0,074	-
15	0,90	-	0,45	-	1,50	-0,148	2,10	-0,092	-
18	1,08	0,357	0,48	-0,080	1,80	-0,160	2,52	-0,105	0,012
20	1,20	-	0,60	-	2,00	-0,184	2,80	-0,113	-
25	1,50	0,510	0,75	-	2,5	-0,210	3,50	-0,116	-
30	1,80	0,578	0,90	-0,153	3,00	-0,226	4,20	-0,116	0,083
40	2,40	0,740	1,20	-0,190	4,00	-0,232	5,60	-0,103	0,215
50	3,00	0,811	1,50	-0,222	5,00	-0,217	7,00	-0,093	0,279
60	3,60	0,850	1,80	-0,300	6,00	-0,200	8,40	-0,095	0,255
80	4,80	0,837	2,40	-0,333	8,00	-0,187	11,20	-0,104	0,213
100	6,00	0,778	3,00	-0,373	10,00	-0,204	14,00	-0,098	0,103
120	7,20	0,731	3,60	-0,402	12,00	-0,205	16,80	-0,098	0,026



Оценка качества переходного процесса

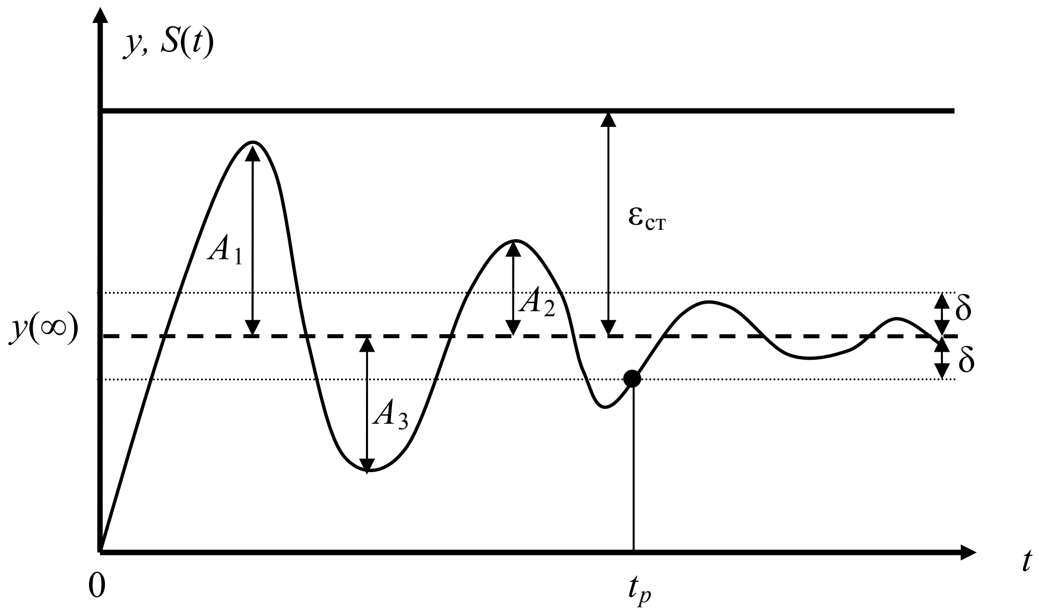
Разделяют прямые и косвенные оценки качества:



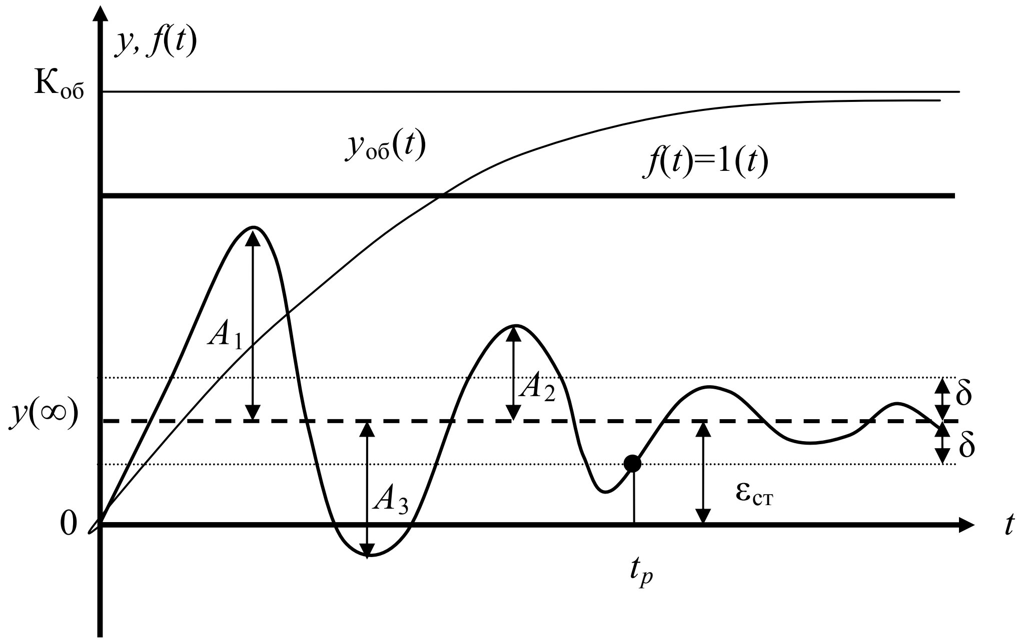
По каналу задания	По каналу возмущения
	

Различают следующие типовые процессы:

1. Колебательные (кривая 1).
2. Монотонный (кривая 2).
3. Апериодический (кривая 3).



а) переходный процесс по заданию



б) переходный процесс по возмущению

Прямые критерии качества:

1. Перерегулирование

$$\sigma = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100\% \; - (\text{а})$$

$$\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100\% \; - (\text{б})$$

2. Максимальная динамическая ошибка

$$A_1 \; - (\text{а})$$

3. Динамический коэффициент регулирования $R_д$ (%) – (б)

$$R_д = \frac{A_1 + y(\infty)}{К_{об}} \cdot 100,$$

где $К_{об}$ – коэффициент передачи объекта (предельное отклонение регулируемой величины объекта $y_{об}(t)$) при отсутствия регулирования.

4. Статическая ошибка

$$\varepsilon_{ст} = S - y(\infty) \; - (\text{а})$$

$$\varepsilon_{ст} = y(\infty) \; - (\text{б})$$

5. Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = 1 - \frac{A_2}{A_1} \approx 1 \; - (\text{а, б})$$

6. Время регулирования ($t_р$ – определяем графически) – это время, по истечению которого отклонение регулируемой величины от установившегося состояния не будет превышать некоторой наперед заданной величины δ. Обычно $\delta = 0{,}05 \cdot y(\infty)$ для процессов (а) и $\delta = 0{,}05 \cdot K_{об}$ для процессов (б).

Косвенные критерии качества

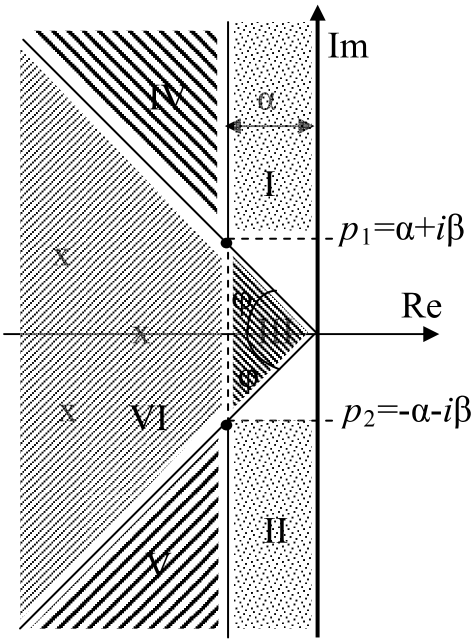
I. Оценка качества переходного процесса по распределению корней характеристического уравнения

Одним из косвенных показателей качества устойчивых АСР является степень удаленности корней характеристического уравнения замкнутой системы лежащих в левой комплексной полуплоскости от мнимой оси.

$$m = tg\varphi$$

Расстояние от ближайшего корня до мнимой оси характеризует запас устойчивости системы и называется степенью устойчивости данной системы.

Наибольший из углов φ образованных отрицательной действительной полуосью и лучами, проведенными из начала координат через корни характеризуют колебательность системы (m – степень колебательности).



Области I и II, соответствующее составляющим переходного процесса системы со степенью устойчивости <α и степенью колебательности <m.

Область III со степенью устойчивости <α и степенью колебательности >m.

Области IV и V степень устойчивости >α и степень колебательности <m.

Область VI степень устойчивости >α степень колебательности >m.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 11.

II. Интегральные оценки качества

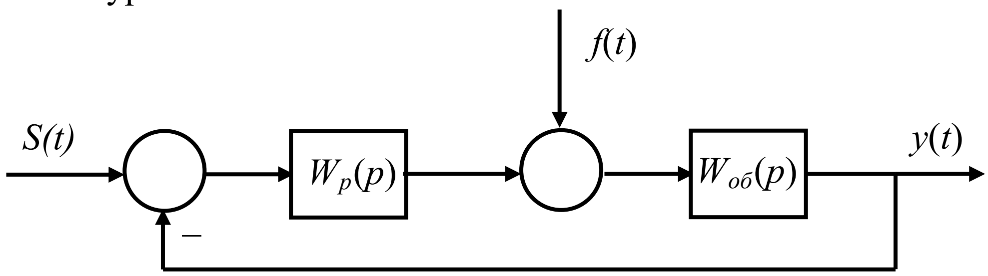
(Интегралы берутся от ошибки регулирования во времени)

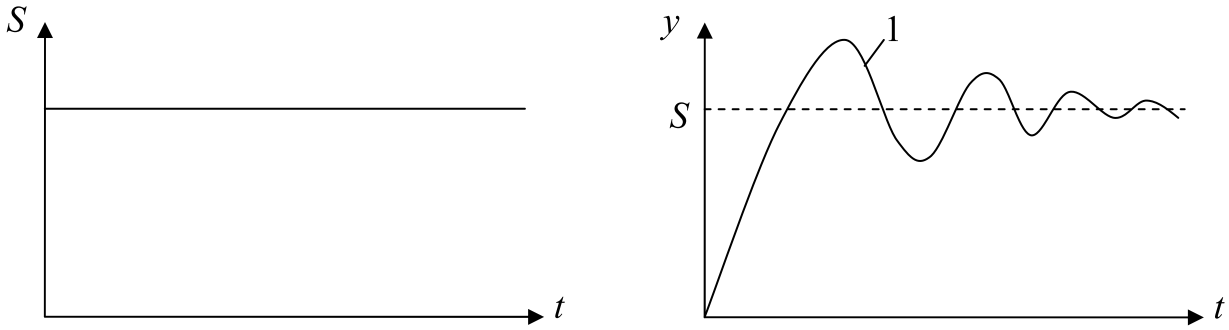
К ним относятся первая интегральная оценка и вторая интегральная оценка (I_1 и I_2).

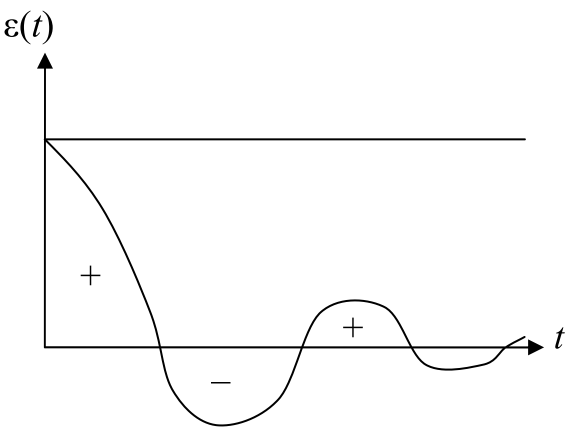
Метод интегральных оценок позволяет получить в результате вычисления определенных интегралов от некоторых функций управляемых переменной суммарную ошибку за все время процесса управления.

Данный интеграл (I_1 и I_2) вычисляемый по коэффициентам дифференциального уравнения всей системы.

Одноконтурная АСР:

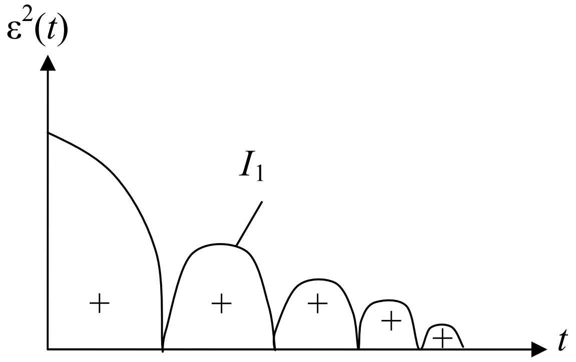




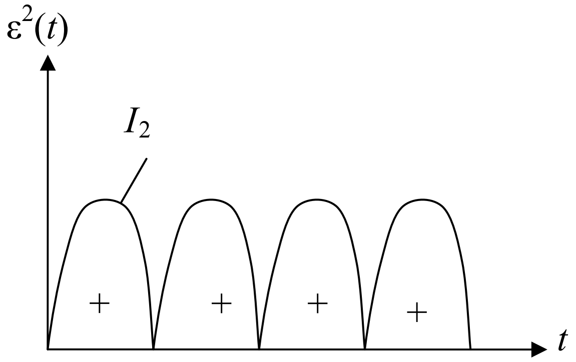


$$I_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t)dt$$

$$\varepsilon(t) = S(t) - y(t)$$



$$I_2 = \int_0^\infty \varepsilon^2(t)dt$$
$$\varepsilon(t) = S(t) - y(t)$$



$$I_2 = \int_0^\infty \varepsilon^2(t)dt$$
$$\varepsilon(t) = S(t) - y(t)$$

I_1 – применяется для процессов монотонных и апериодических.
I_2 – для сильноколебательных процессов

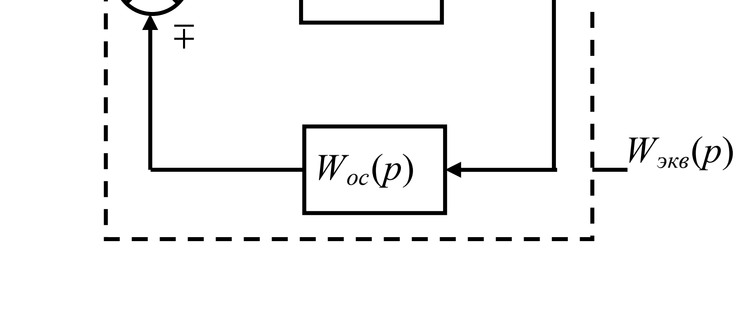
Методы коррекции автоматических систем

Коррекция автоматических систем является одним из основных вопросов теории и практики автоматического управления.

Обеспечение устойчивой и качественной работы систем управления с помощью дополнительных устройств называется <u>коррекцией</u>, а сами устройства <u>корректирующими</u>.

Существуют различные методы коррекции. Основное значение и наиболее широкое распространение приобрели дополнительные обратные связи, которые могут охватывать одно или несколько звеньев. Эти связи называются внутренними. Также существует гибкая обратная связь и жесткая обратная связь.

Пример:



$$W_{экв}\left(p\right) = \frac{W\left(p\right)}{1 \pm W(p) \cdot W_{oc}\left(p\right)}, (*)$$

Для жесткой обратной связи справедливо:

$$Woc\left(p\right) = \beta, \qquad \beta = const.$$

1. Жесткая обратная связь охватывает пропорциональное звено с передаточной функцией $W(p)=k$

$$W_{экв}\left(p\right)=\frac{k}{1\pm k\cdot\beta}=k_{экв}\,, \qquad (1)$$

На основании (1) можно сказать, что эквивалентное звено получилось также пропорционально при измененном коэффициенте усиления. При наличие жесткой отрицательной обратной связи $k_{экв}$ уменьшается, а при наличие положительной увеличивается.

2. Жесткая обратная связь охватывает апериодическое звено первого порядка.

$$W\left(p\right)=\frac{k}{T\cdot p+1};$$

$$W_{экв}\left(p\right)=\frac{\dfrac{k}{T\cdot p+1}}{1\pm\dfrac{k}{T\cdot p+1}\cdot\beta}=\frac{k}{\left(T\cdot p+1\right)\pm k\cdot\beta}=\frac{k}{\left(1\pm k\cdot\beta\right)+T\cdot p}=\frac{k_{экв}}{T_{экв}\cdot p+1}. \qquad (2)$$

где $k_{экв}=\dfrac{k}{1\pm\beta\cdot k}$, $T_{экв}=\dfrac{T}{1\pm\beta\cdot k}$.

На основании уравнения (2) можно заметить, что эквивалентное звено получается также апериодическим при измененных коэффициентах усиления (k) и постоянной времени (T). При наличии жесткой отрицательной связи происходит уменьшение чувствительности звена ($k_{экв}<k$) и увеличение быстродействия ($T_{экв}<T$).

При наличие жесткой положительной обратной связи имеет место обратное явление.

3. Жесткая обратная связь охватывает интегрирующее звено

$$W\left(p\right)=\frac{k}{T\cdot p}$$

$$W_{экв}\left(p\right)=\frac{\dfrac{k}{T\cdot p}}{1\pm\dfrac{k}{T\cdot p}\cdot\beta}=\frac{k}{T\cdot p\pm k\cdot\beta}=\frac{k_{экв}}{\pm1+T_{экв}\cdot p}. \qquad (3)$$

где $k_{экв}=\dfrac{1}{\beta}$; $T_{экв}=\dfrac{T}{\beta k}$.

Таким образом, в результате охвата интегрирующего звена жесткой отрицательной обратной связью имеем апериодическое звено первого порядка и оно устойчиво, а при жесткой положительной обратной связи звено неустойчиво.

Вывод: жесткая отрицательная обратная связь уменьшает постоянную времени звеньев и увеличивает статическую ошибку системы, т.к. при этом снижается коэффициент усиления охватываемого звена.

Жесткая положительная обратная связь, наоборот, увеличивает коэффициент усиления и постоянную времени звена, кроме того, жесткая обратная связь позволяет изменить структуру охватываемого звена улучшая его свойства при отрицательной связи, при положительной иногда создаются положительные звенья.

4. Гибкая обратная связь – это связь при которой происходит дифференцирование. В обратной связи (ОС) включается дифференциальное звено.

$$W_{oc}(p) = T_{oc} \cdot p.$$

Гибкая ОС охватывает пропорциональное звено.

$$W(p) = k$$

$$W_{экв}(p) = \frac{k}{1 \pm k \cdot T_{oc} \cdot p} = \frac{k}{1 \pm T_{экв} \cdot p}. \qquad (4)$$

где $T_{экв} = k \cdot T_{oc}$.

В результате охвата гибкой ОС изменяется структура звена.

5. Гибкая обратная связь охватывает апериодическое звено 1-го порядка.

$$W(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1}.$$

$$W_{экв}(p) = \frac{\frac{k}{T \cdot p + 1}}{1 \pm \frac{k}{T \cdot p + 1} \cdot T_{oc} \cdot p} = \frac{k}{(T \cdot p + 1) \pm k \cdot T_{oc} \cdot p} = \frac{k}{1 + (T \pm k \cdot T_{oc}) \cdot p} =, \qquad (5)$$

$$= \frac{k}{1 + T_{экв} \cdot p}.$$

где $T_{экв} = T \pm k \cdot T_{oc}$.

Идеальная гибкая обратная связь не изменяет коэффициент усиления k, а позволяет изменить постоянную времени, что способствует стабилизации системы, однако при положительной обратной связи может быть получено неустойчивое звено.

6. Гибкая обратная связь охватывает интегрирующее звено

$$W(p) = \frac{k}{T \cdot p}.$$

$$W_{экв}(p) = \frac{\frac{k}{T \cdot p}}{1 \pm \frac{k}{T \cdot p} \cdot T_{oc} \cdot p} = \frac{k}{T \cdot p \pm k \cdot T_{oc} \cdot p} == \frac{k}{(T \pm k \cdot T_{oc}) \cdot p} = \frac{k}{T_{экв} \cdot p}. \qquad (6)$$

где $T_{экв} = T \pm k \cdot T_{oc}$.

Из уравнения (6) видно, что структура звена сохранилась, коэффициент усиления остался прежним, однако изменилось постоянная времени.

Вывод:

1. При обхвате гибкой обратной связью возможно изменение структуры звена (см. примеч. 4).

2. Коэффициент усиления звена остается без изменения.

3. Гибкая обратная связь позволяет изменить значение постоянных времени (T).

При смешанной обратной связи:

$$W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}\left(1 \pm T'_{oc} \cdot p\right)}{1 \pm T''_{oc} \cdot p}.$$

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

Лекция 12.

Методы синтеза автоматических систем регулирования

Существуют графические и аналитические методы синтеза АСР. Графические методы имеют приближенный характер.

К аналитическим методам относятся:

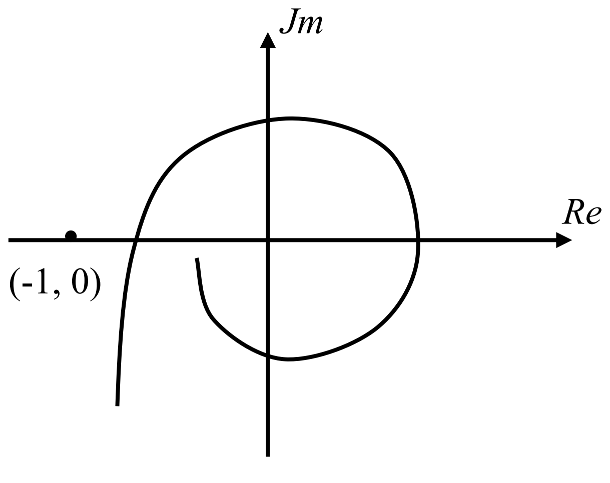
1. Метод Ротача.
2. Метод расширения амплитудно-фазочастотных характеристик (РАФЧХ).

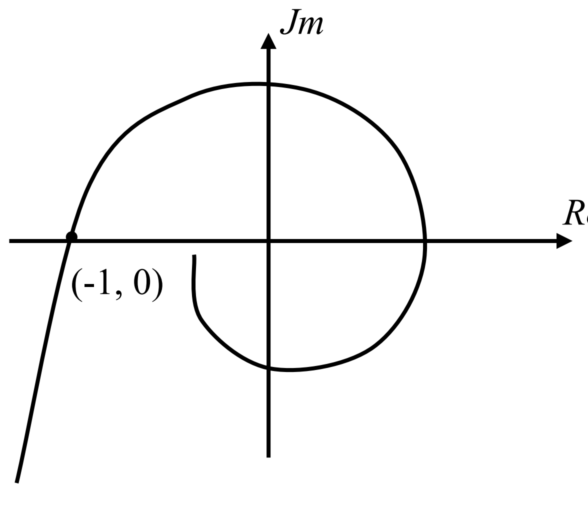
Метод РАФЧХ – базируется на критерии устойчивости Найквиста, который можно интерпретировать как критерий запаса устойчивости по расположению корней характеристического уравнения. Для расширенной

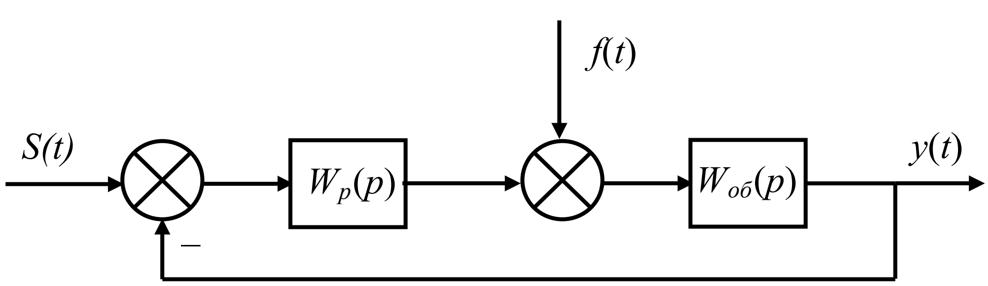
$$p = -m \cdot \omega + i \cdot \omega$$

где m – запас устойчивости.

Суть метода: Если РАФЧХ устойчивой, или нейтрально-разомкнутой системы $W_{pc}(m, i \cdot \omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ проходит через точку (–1; 0) не охватывая ее на более высоких частотах, то корни характеристического уравнения замкнутой системы, будут расположены в левой полуплоскости на лучах $-m \cdot \omega + i \cdot \omega$ и внутри этого сектора.







$$W_p(p) = K_p + \frac{K_p}{Tu \cdot p}$$

$$W_{pc}(p) = W_p(p) \cdot W_{об}(p);$$
$$W_{pc}(m,\omega) = W_p(m,\omega) \cdot W_{об}(m,\omega);$$
$$W_{pc}(m,\omega) = Re_{pc}(m,\omega) + i \cdot Im_{pc}(m,\omega);$$
$$W_{об}(m,\omega) = Re_{об}(m,\omega) + i \cdot Im_{об}(m,\omega);$$

а)
$$W_p(m,\omega) = K_p + \frac{K_p}{Tu \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega)} = K_p + \frac{K_p(-m \cdot \omega - i \cdot \omega)}{Tu \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega)(-m \cdot \omega - i \cdot \omega)} =$$
$$= K_p - \frac{K_p(m \cdot \omega + i \cdot \omega)}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)} = K_p - \frac{K_p m \cdot \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)} + i \cdot \frac{K_p \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)}. \quad (1)$$

$$Re_p(m,\omega) = K_p - \frac{K_p m \cdot \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)},$$

$$Im_p(m,\omega) = i \cdot \frac{K_p \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)}.$$

Из уравнения (*) см. прошлую лекцию, то чтобы найти корни характеристического уравнения расширенной системы, мы должны знаменатель $1 + W_{pc}(p) = 0$ (характеристическое уравнение) приравнять нулю.

$$W_{pc}(p) = -1,$$
$$W_p(p) \cdot W_{об}(p) = -1.$$

Тогда

$$W_p(p) = \left.\frac{-1}{W_{об}(p)}\right|_{p=-m\cdot\omega+i\cdot m} = -\frac{1}{Re_{об}(m,\omega) + i \cdot Im_{об}(m,\omega)} =$$
$$= -\frac{Re_{об}(m,\omega) - i \cdot Im_{об}(m,\omega)}{\left[Re_{об}(m,\omega)\right]^2 + \left[Im_{об}(m,\omega)\right]^2} = \frac{i \cdot Im_{об}(m,\omega) - Re_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)} = \quad (2)$$
$$= \frac{-Re_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)} + i \cdot \frac{Im_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)}.$$

Две комплексные функции или два комплексных числа считаются равными, если равны их соответствующие действительная и мнимая части. Нам известно соотношение связывающие передаточные функции объекта и регулятора. приравняем соответствующие действительные и мнимые части этих двух передаточных функций, тогда получим.

$$\frac{K_p \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)} = \frac{Im_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)}; \quad (3)$$

$$K_p - \frac{K_p \cdot m \cdot \omega}{Tu \cdot \left(m^2 \cdot \omega^2 + \cdot \omega^2\right)} = \frac{-Re_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)}. \quad (4)$$

Ввиду того, что передаточная функция регулятора имеет вид $W_p(p) = K_p + \frac{K_p}{Tu \cdot p}$, где K_p – пропорциональный регулятор (И), а $\frac{K_p}{Tu \cdot p}$ – интегральный регулятор, найдем эти неизвестные из выражений (3) и (4). Найдем сначала интегральную часть $\frac{K_p}{Tu}$ из выражения (3).

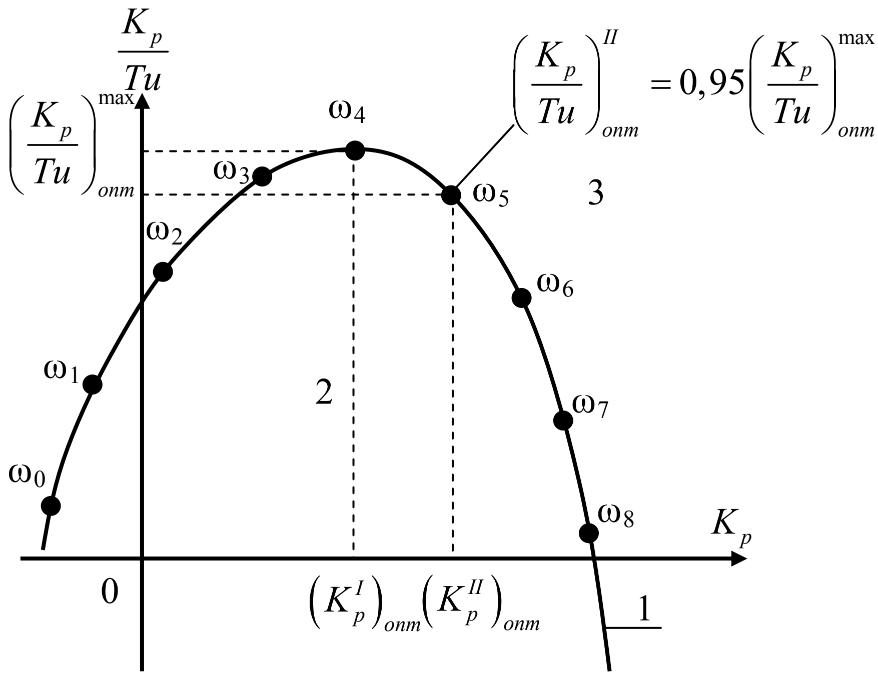
$$\frac{K_p}{Tu} = \frac{Im_{об}(m,\omega) \cdot (m^2 \cdot \omega^2 + \cdot\omega^2)}{A_{об}^2(m,\omega) \cdot \omega}. \tag{5}$$

Затем определим пропорциональную часть K_p из выражения (4), причем отношение $\frac{K_p}{Tu}$ с левой стороны от знака равенства уже определена (5), тогда получим.

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{K_p \cdot m \cdot \omega}{Tu \cdot (m^2 \cdot \omega^2 + \cdot\omega^2)} - \frac{Re_{об}(m,\omega)}{A_{об}^2(m,\omega)} = \\ &= \frac{Im_{об}(m,\omega) \cdot (m^2 \cdot \omega^2 + \cdot\omega^2) \cdot m \cdot \omega}{A_{об}^2(m,\omega) \cdot \omega \cdot (m^2 \cdot \omega^2 + \cdot\omega^2)} - \frac{Re_{об}(m,\omega)}{A_{об}^2(m,\omega)} = \\ &= \frac{Im_{об}(m,\omega) \cdot m}{A_{об}^2(m,\omega)} - \frac{Re_{об}(m,\omega)}{A_{об}^2(m,\omega)} = \frac{-Re_{об}(m,\omega) + m \cdot Im_{об}(m,\omega)}{A_{об}^2(m,\omega)}. \end{aligned} \tag{6}$$

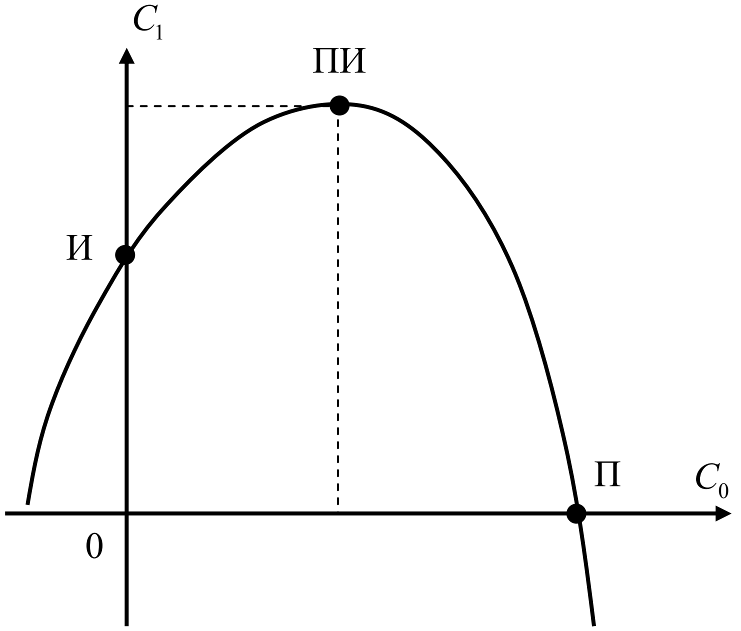
Для того, чтобы построить график запаса устойчивости необходимо сделать следующие вычисления и занести их в таблицу.

ω	$Re_{об}(m,\omega)$	$Im_{об}(m,\omega)$	$A_{об}^2(m,\omega)$	K_p	K_p / Tu
0					
0,005					
…					
∞					



Граница заданного запаса устойчивости
(определяется оптимальная точка для ПИ–регулятора):
1 – граница запаса устойчивости $\psi = const\left(m = const\right)$; 2 – область большего запаса устойчивости (степень затухания выше); 3 – область меньшего запаса устойчивости (степень затухания ниже); *I* – первый интегральный критерий; *II* – второй интегральный критерий

$$W_p\left(p\right) = K_p + \left(\frac{K_p}{Tu \cdot p}\right) = C_0 + \frac{C_1}{p}$$



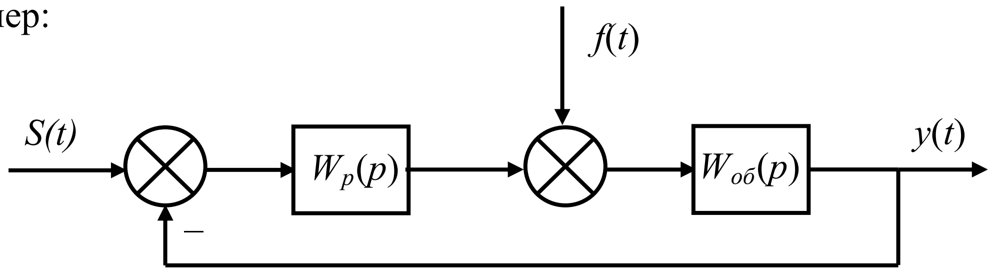
$$W_p^{П}\left(p\right) = K_p = C_0, \left(C_1 \to 0\right)$$

$$W_p^{И}\left(p\right) = \frac{K_p}{Tu \cdot p} = \frac{C_1}{p}, \left(C_0 \to 0\right)$$

$$\psi_{зад} = 1 - e^{-2\pi m}.$$

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 13.

Пример:



$$W_p(p) = K_p + \frac{K_p}{Tu \cdot p}, \; W_{об}(p) = \frac{K}{Tu \cdot p} \cdot e^{-p\tau}$$

$$W_{об}(p) = \frac{K}{Tu \cdot p} \cdot e^{-p\tau} = \frac{K \cdot e^{-(-m\cdot\omega + i\cdot\omega)\cdot\tau}}{T(-m\cdot\omega + i\cdot\omega) + 1} =$$

$$= \frac{K \cdot e^{m\cdot\omega\cdot\tau} \cdot e^{-i\cdot\omega\cdot\tau}}{-m\cdot\omega\cdot T + i\cdot\omega\cdot T + 1} =$$

$$= \frac{K \cdot \left(\sin(m\cdot\omega\cdot\tau) + i\cos(m\cdot\omega\cdot\tau)\right) \cdot \left(\cos(m\cdot\omega\cdot\tau) - i\sin(m\cdot\omega\cdot\tau)\right)}{-m\cdot\omega\cdot T + i\cdot\omega\cdot T + 1} =$$

$$= \frac{K \cdot \left[i\left(\cos^2(m\cdot\omega\cdot\tau) - \sin^2(m\cdot\omega\cdot\tau)\right) + 2\cdot\sin(m\cdot\omega\cdot\tau)\cdot\cos(m\cdot\omega\cdot\tau)\right]}{-m\cdot\omega\cdot T + i\cdot\omega\cdot T + 1} \cdot$$

$$\cdot \frac{1 - m\cdot\omega\cdot T - i\cdot\omega\cdot T}{1 - m\cdot\omega\cdot T - i\cdot\omega\cdot T}.$$

$$Re = \frac{K \cdot \left[\omega\cdot T\cdot\left(\cos^2(m\cdot\omega\cdot\tau) - \sin^2(m\cdot\omega\cdot\tau)\right) + \left(1 - m\cdot\omega\cdot T\right)\cdot 2\cdot\sin(m\cdot\omega\cdot\tau)\cdot\cos(m\cdot\omega\cdot\tau)\right]}{\left(1 - m\cdot\omega\cdot T\right)^2 + \left(\omega\cdot T\right)^2}.$$

и.т.д.

Нелинейные системы

Разнообразие нелинейных систем

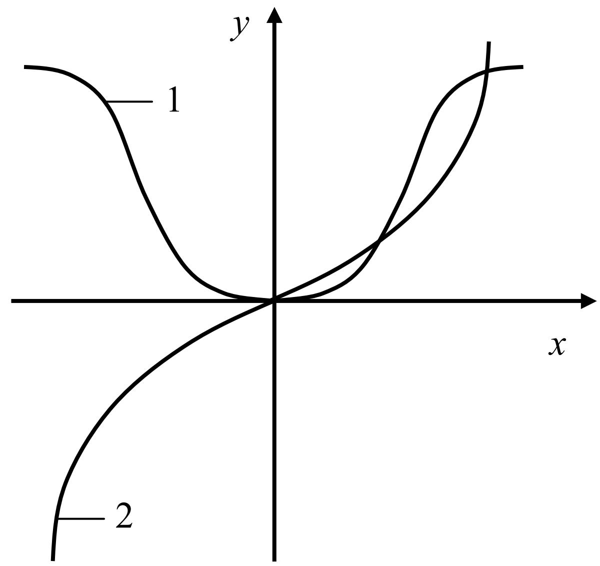
Нелинейные системы – те у которых уравнение статики или динамики имеют вид отличный от первого порядка.

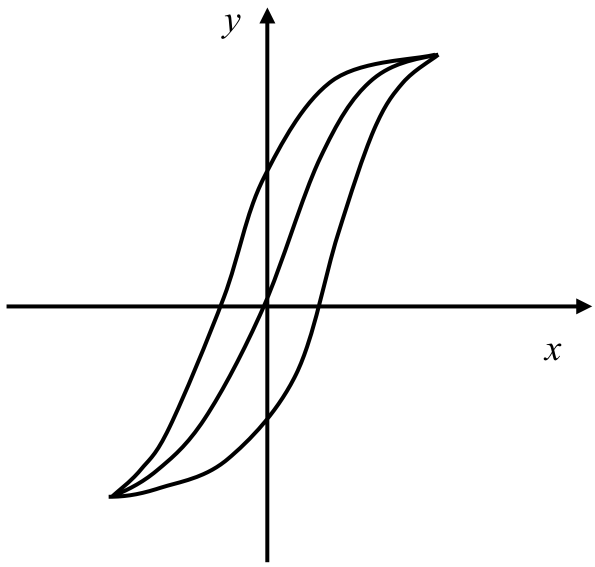
Классифицировать нелинейные звенья можно по различным признакам:

1. По физическим принципам действия.
2. По способам аппроксимации.
3. По статическим и динамическим характеристикам.

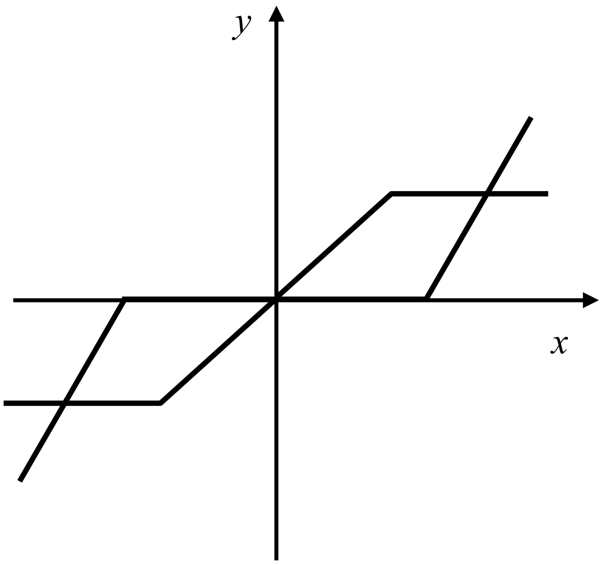
Наиболее часто в практике автоматических систем встречаются следующие нелинейные звенья:

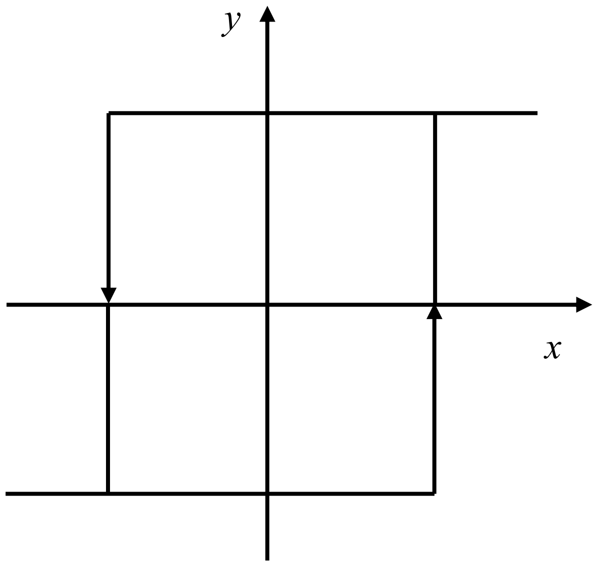
1) С гладкой нелинейной характеристикой.





2) С кусочно-линейной характеристикой.





В общем случае, при наличие существенных нелинейностей, поведение нелинейной системы значительно отличается от поведения линейной; из-за нелинейности характеристик выходная переменная не будет пропорциональна входной переменной, поэтому форма реакции системы на скачкообразный сигнал будет зависеть от величины этого сигнала. Для некоторых нелинейных систем изменение входного сигнала может привести устойчивый переходной процесс к неустойчивому и наоборот. При одних значениях параметров в нелинейной системе устойчивость определяется также параметрами настройки регулятора.

II теорема Ляпунова:

1. Система устойчива «в малом», если она устойчива при малых (бесконечно малых) начальных отклонениях.
2. Система устойчива «в большом», если она устойчива при больших (конечных по величине) начальных отклонениях.
3. Система устойчива в целом, если она устойчива при любых больших (неограниченных по величине) начальных отклонениях.

Метод фазовой плоскости

(метод исследования нелинейных систем)

Состояние автоматической системы в любой момент времени может быть охарактеризована значениями рассматриваемой переменной и (n–1) ее производных, поэтому для рассмотрения системы n–го порядка необходимо использовать n–мерное пространство.

Если в данный момент времени по указанным осям отложить значение переменных и (n–1) ее производных, то будет получена точка, изображающая содержание системы. Указанное пространство называется фазовым, а точка, соответствующая состоянию системы в фазовом пространстве – изображающей.

При установившемся равномерном состоянии системы изображающая точка находится в покое, а во время переходного процесса, переменная и ее производные в каждый момент времени будут иметь различные значения, поэтому изображающая точка будет перемещаться в фазовом пространстве, каждому определенному процессу автоматической системы в фазовом пространстве соответствует определенная траектория движения изображения точки.

Начальное отклонение изображающей точки, определяется начальными условиями, а совокупность фазовых траекторий для всевозможных начальных отклонениях называется **фазовым портретом системы**.

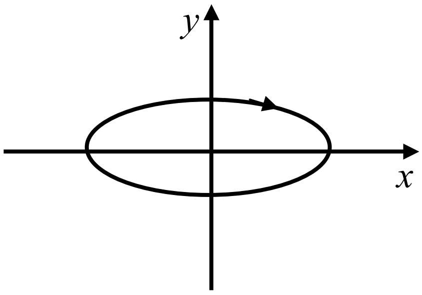
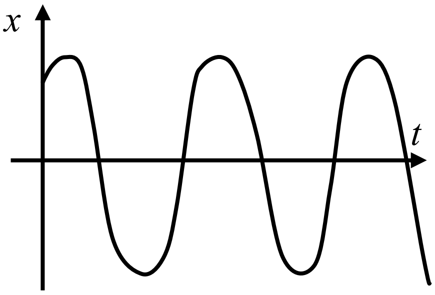
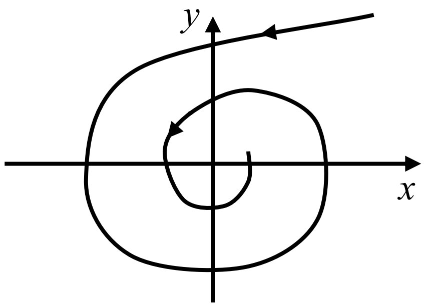
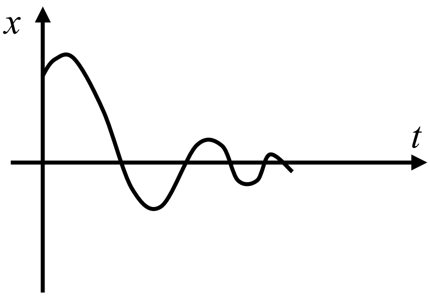
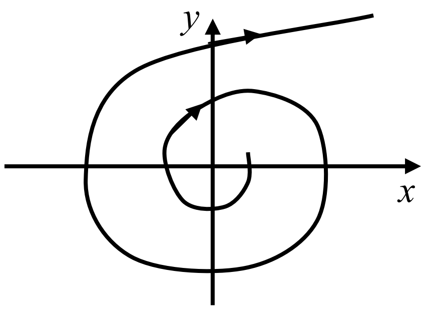
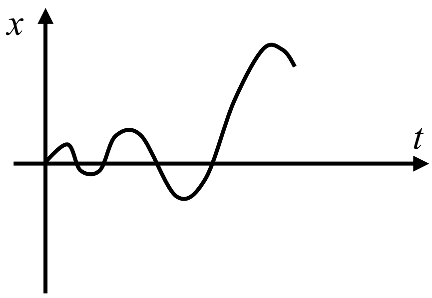
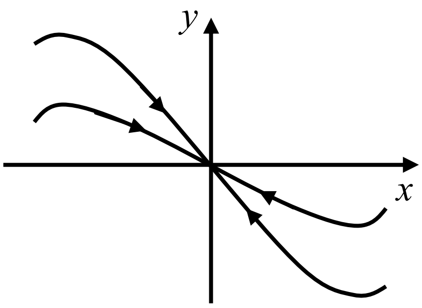
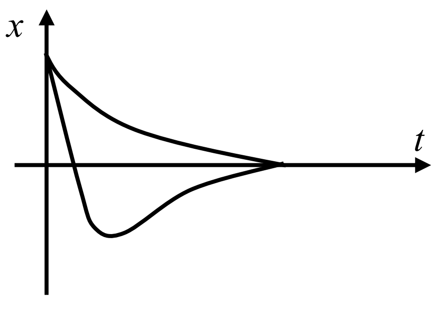
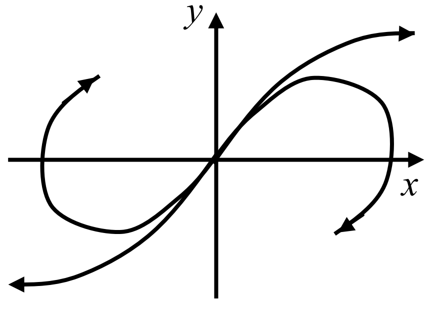
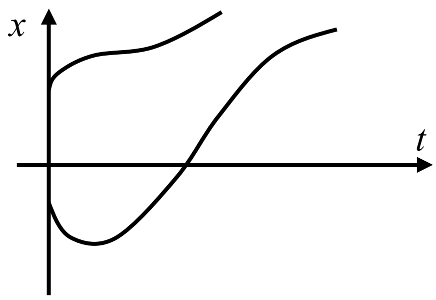
Наибольшее практическое применение этот метод получил для нелинейных систем 2-го порядка.

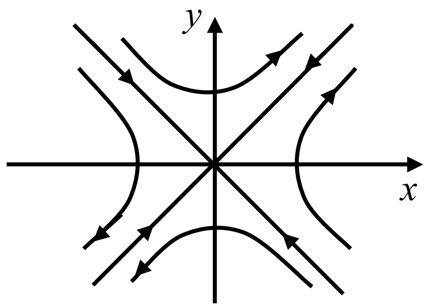
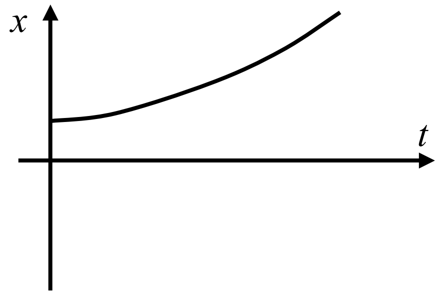
Один из методов построения в фазовой плоскости является метод изоклин.

Помимо прочего, фазовый портрет системы характеризуется особыми точками. Существует следующая классификация особых точек:

1. Особые точки типа центр.
2. Типа устойчивый фокус.
3. Типа неустойчивый фокус.
4. Типа устойчивый узел.
5. Типа неустойчивый узел.
6. Типа седло.

$$y = \frac{dx}{dt}$$

Тип особой точки	Фазовая траектория	Переходный процесс
1. Центр		
2. Устойчивый фокус		
3. Неустойчивый фокус		
4. Устойчивый узел		
5. Неустойчивый узел		

6. Седло		

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 14.

Часть II
Автоматическое регулирование

Схемы автоматического регулирования

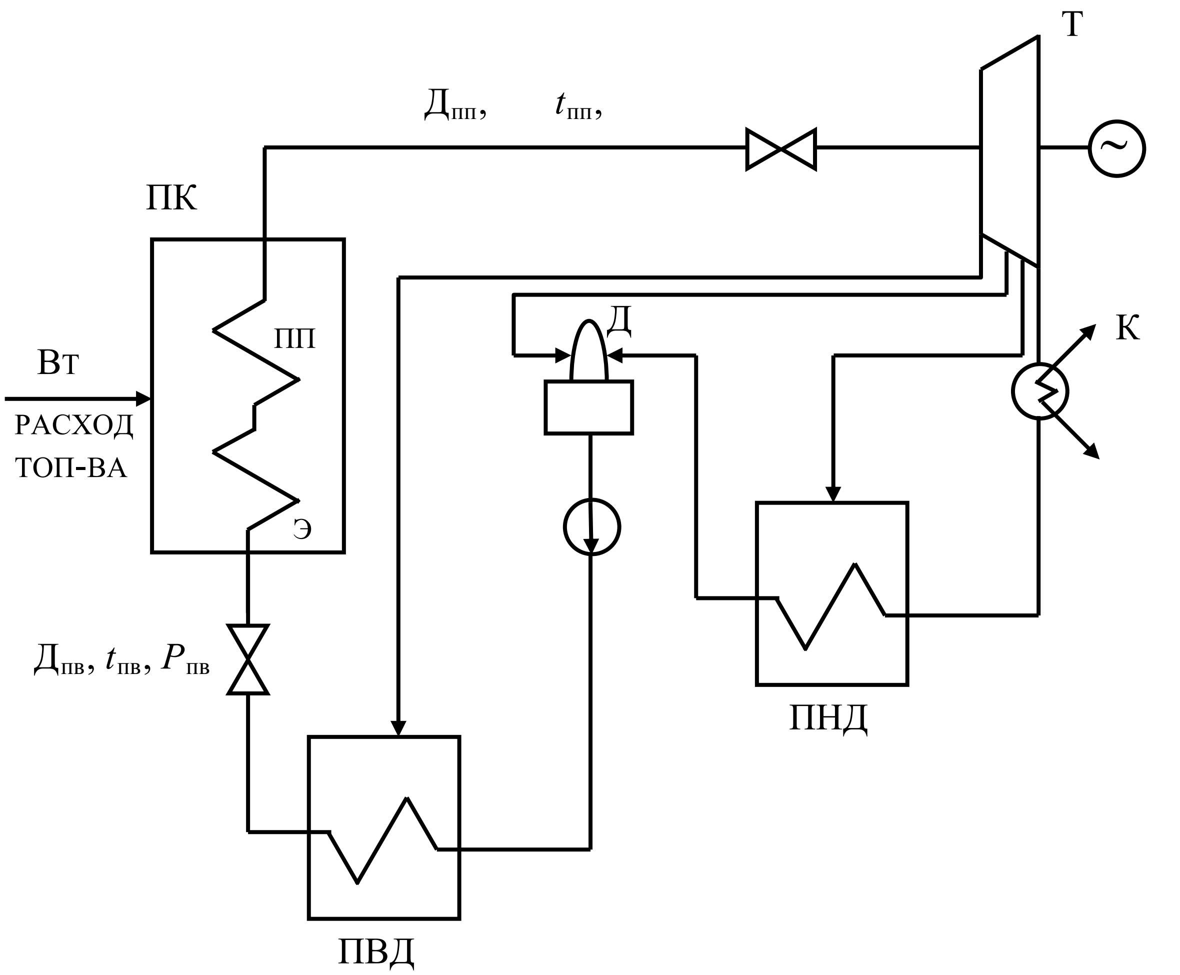


Рис. 1.Принципиальная схема барабанного парового котла:
Вт – расход топлива;

К основным задачам автоматизации энергоустановок относятся:

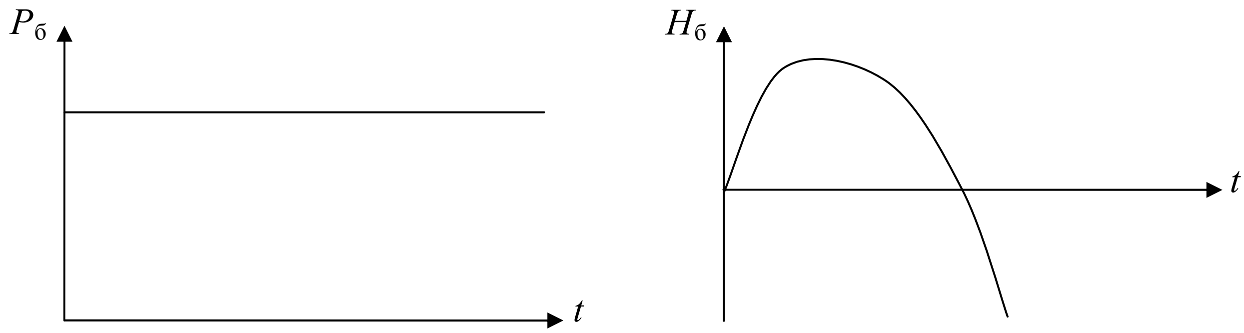
1. Автоматическое регулирование основных параметров, характеризующих качество процессов протекающих в установке при нормальных эксплутационных режимах.
2. Автоматическая защита и блокировка оборудования, что имеет место в аварийных ситуациях.
3. Автоматическое регулирование операций «пуска» и «останова».

Задачей регулирования автоматического процесса котлоагрегата является, в основном, к необходимости поддерживания материального и энергетического баланса в нем.

2. Возмущение нагрузкой потребителя

Изменение нагрузки потребителя при стабильном расходе топлива, вызывает отклонения давления в котле. При увеличении нагрузки падает давление в барабане котла, что вызывает соответствующее увеличение удельного объема пара в пароводяной смеси, а также при снижении давлений уменьшается температура кипения воды в циркуляционном контуре и за счет тепла аккумуляции происходит дополнительное парообразование, что приводит к дополнительному паросодержанию. Таким образом, происходит повышение уровня в барабане котла. При повышения давления в котле, увеличивается температура кипения, поэтому часть тепла, воспринятыми экранными трубами расходуется на дополнительный подогрев воды до температуры кипения, парообразование уменьшается, следовательно, снижается паросодержание. Все это приводит к падению уровня.

Т.о. уменьшение паровой нагрузки при неизменном расходе питательной воды и топлива в начальный момент времени вызывает «набухание» уровня, после чего через некоторое время уровень начинает изменяться в сторону, определяющуюся знаком нематериального баланса.



Временная характеристика по расходу от Барабана

$$W_{об}(p) = W_6(p) + W_7(p) = \frac{k}{T_6 \cdot p + 1} - \frac{1}{T_7 \cdot p}.$$

3. Возмущения расходом топлива

Характер переходного процесса по уровню при возмущении расхода топлива при неизменном расходе питательной воды аналогичен характеру переходного процесса при возмущении нагрузке потребителя. Однако численные значения коэффициентов в уравнении передаточной функции различны. Это связано с тем, что при увеличении нагрузки потребителя за счет аккумуляции тепла происходит дополнительное парообразование и одновременно увеличение удельного объема пара, т.е. оба эти фактора влияют на изменение уровня в одном направлении. В случае изменения расхода топлива, изменяется парообразование и одновременно идет процесс аккумуляции тепла. При этом воздействие этих факторов при изменении уровня проявляется по разному. Так, при увеличении парообразования в испарительном контуре при увеличении расхода топлива вызывает повышение уровня воды ($H_б$), в тоже время увеличение давления, которое сопровождается уменьшением удельного объема и увеличением температуры кипения вызывает снижением уровня. Т.о. при возмущении расходом топлива в испарительном контуре протекают два противоположенных процесса и набухание уровня проявляется в меньшей степени, чем в случае возмущения нагрузки потребителем.

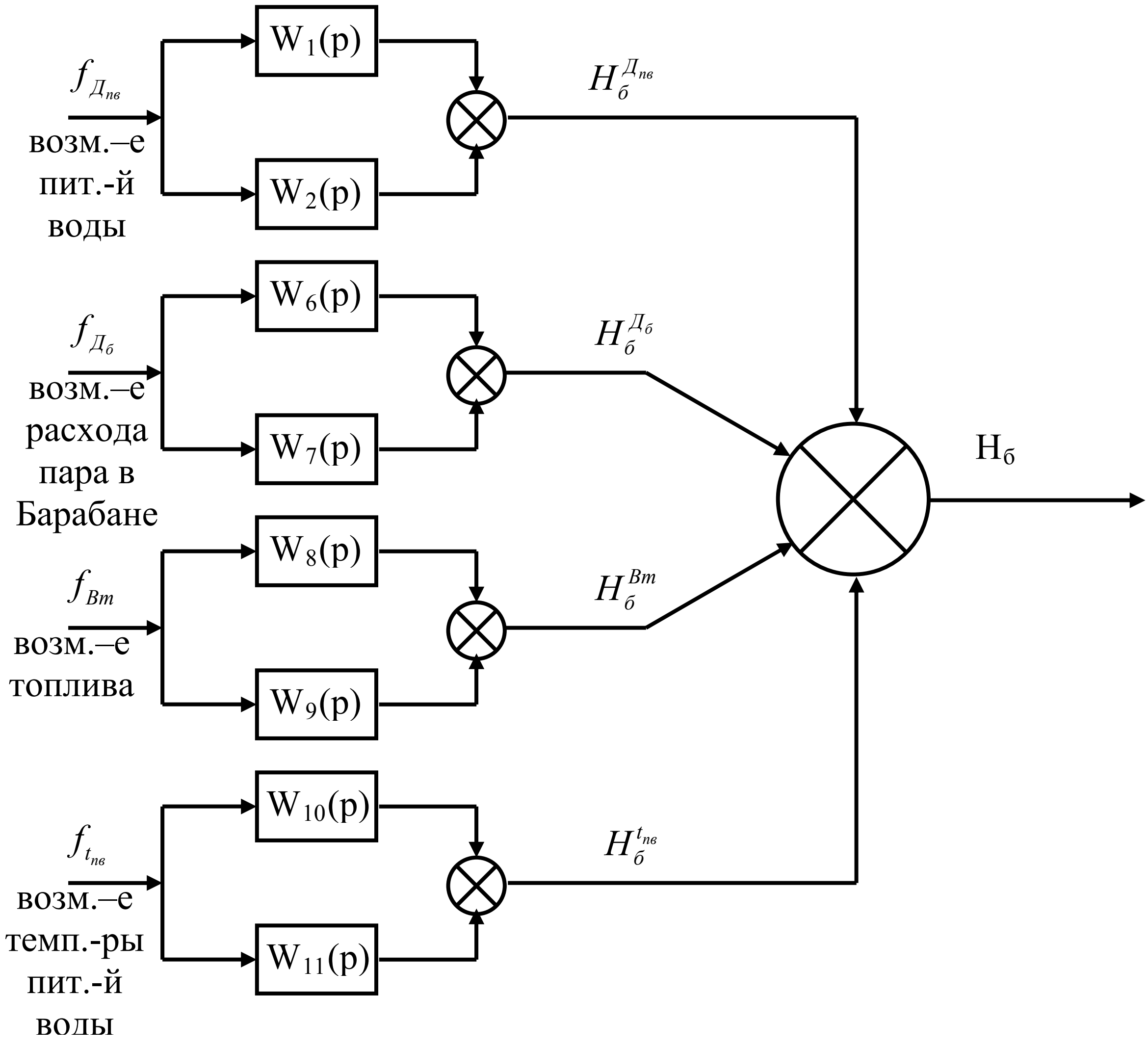
$$W_{об}(p) = W_8(p) + W_9(p) = \frac{k}{T_8 \cdot p + 1} - \frac{1}{T_9 \cdot p}$$

4. Возмущение температурой питательной воды

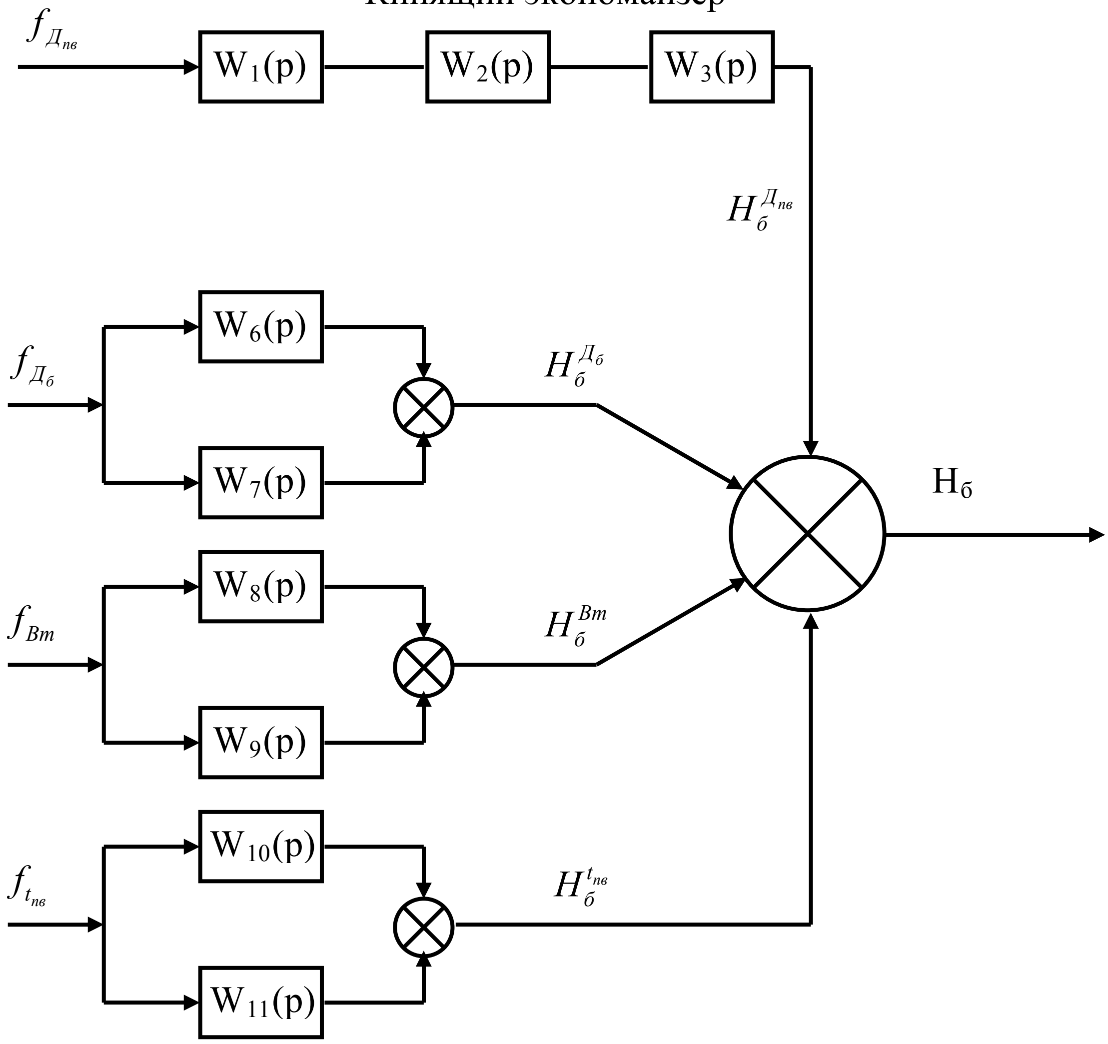
При увеличении температуры питательной воды и постоянном обогреве (Вт=*const*) увеличивается парообразование в испарительном контуре. В результате уровень в барабане котла будет повышаться. Дальнейшее увеличение парообразования при Дб=*const* (расход пара от барабанного котла) приводит к подъему давления в барабане, а следовательно к уменьшению удельного объема пара и сокращению парообразования, что вызывает снижение уровня.

$$W_{об}(p) = W_{10}(p) + W_{11}(p) = \frac{k}{T_{10} \cdot p + 1} - \frac{1}{T_{11} \cdot p}$$

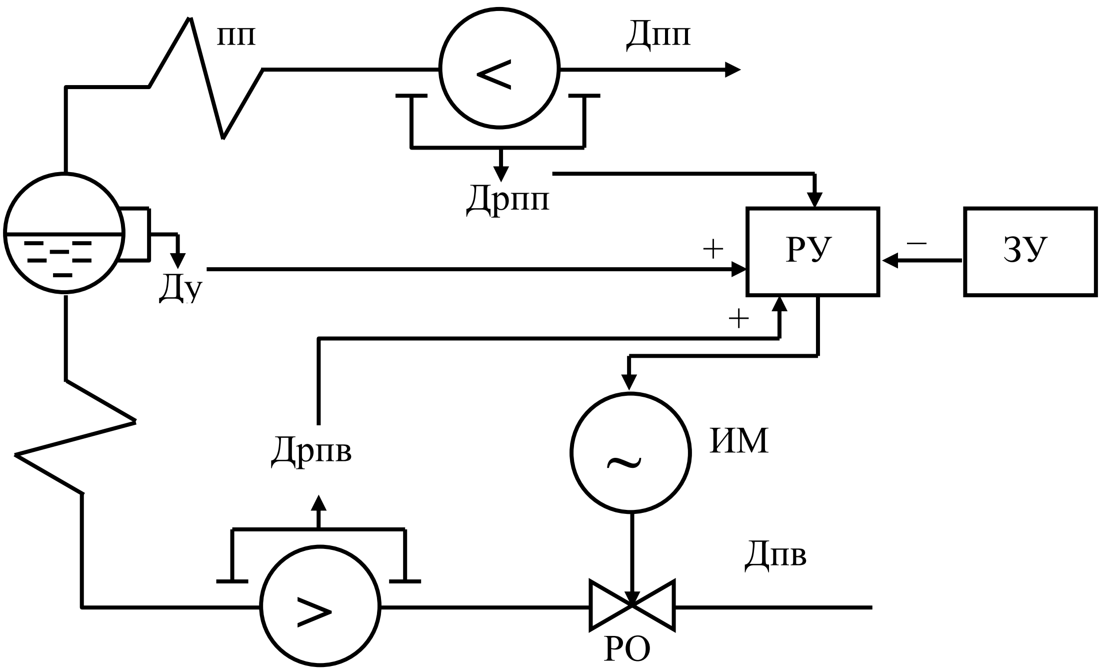
Структурная схема (некипящий экономайзер)



Кипящий экономайзер



Трех импульсная АСР питания



Дпп – расход перегретого пара;
Дрвп – датчик расхода питательной воды;
ДУ – датчик уровня;
РУ – регулирующее устройство;
ЗУ – задающее устройство;
ИМ – исполнительный механизм;
пп – перегретый пар;
Дрпп – датцик расхода перегретого пара;
Дпв – расход питательной воды.

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.

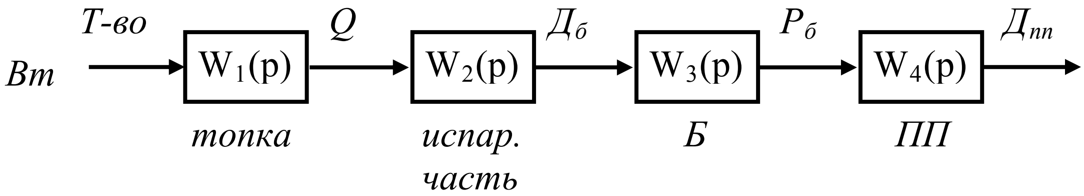
Лекция 15.

Регулирование нагрузки и процесса горения

Регулирование давления перегретого пара и тепловой нагрузки

Условие, определяющее материальный баланс потребляемого и генерируемого пара является постоянство давления в какой-либо точке парового тракта.

ПК (паровой котел) как объект регулирования можно представить:



$$W_1(p)=\frac{k_1}{T_1\cdot p+1};\; W_2(p)=\frac{k_2}{T_2\cdot p+1};\; W_3(p)=\frac{1}{T_3\cdot p};\; W_4(p)=k.$$

где Q – теплота; Дб – паросъём; Рб – давление в барабане; Дпп – расход перегретого пара; ПП – пароперегреватель.

Регулирование удаления принципиально возможно как в барабанном котле, так и перед потребителем. Однако с целью уменьшения тормозящего влияния аккумуляции тепла, желательно регулировать давление в барабане котла.

Однако, эта схема (последняя) при внутренних возмущениях возможно перераспределение нагрузки между котлом, в переходных режимах, вследствие значительной инерционности импульса по давлению пара в барабане. Чтобы исключить такое распределение необходимо обеспечить большое быстродействие регулятора нагрузки. для этого применяют менее инерционный импульс, характеризующий количество топлива сожженного в топке – это импульс по теплу.

Изменении тепловыделения Q'_T приводит к изменению паропроизводительности $Д_Б$ и к изменению $P_Б$. Если прирост расхода топлива и тепловыделения идет целиком на нагрев пароводяной смеси и ме-ла парообразующей части, то скорость изменения давления $\frac{dP_б}{dt}$ будет прямопропорционально теплоте, затраченной на нагрев паровой смеси или разность между воспринятым и ушедшим с паром кол-ами теплоты.

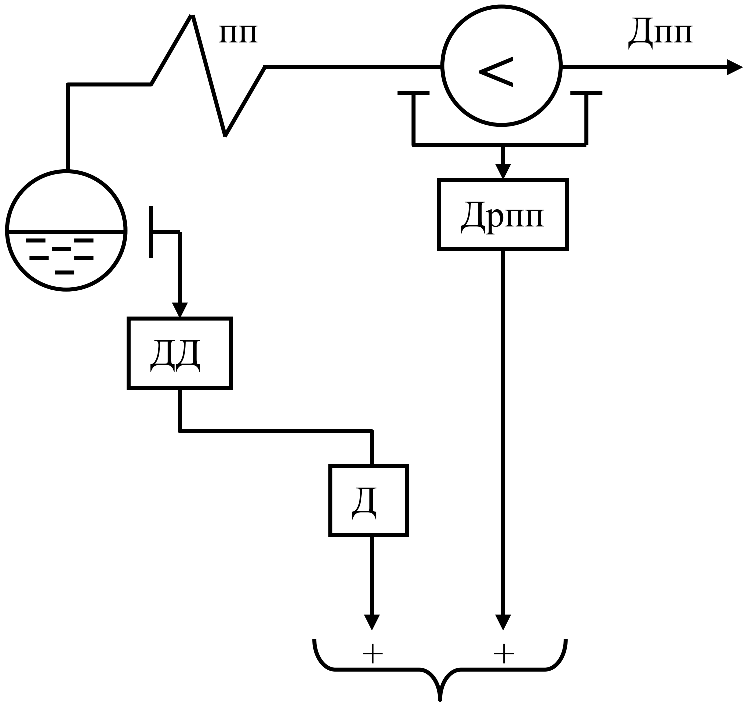
$$A\cdot\frac{dP_Б}{dt}=Q'_T-Д_Б\left(h_{Н.П.}-h_{П.В.}\right)$$

н.п. – насыщение пара (на выходе барабана).

п.в. – .

A – коэффициент характеризующий тепловую аккумулирующую способность пароводяной смеси и ме-ла испарительной части.

$$\underbrace{\frac{A}{\left(h_{Н.П.}-h_{П.В.}\right)}}_{C_n}\cdot\frac{dP_Б}{dt}=\underbrace{\frac{Q'_T}{\left(h_{Н.П.}-h_{П.В.}\right)}}_{Д_q}-Д_Б$$



$h_{Н.П.}$ – энтальпия перегретого пара;

$h_{П.В.}$ – энтальпия питательной воды;

C_n – постоянная, характеризующая массовую аккумулирующую скорость пароводяной смеси и ме-ла труб;

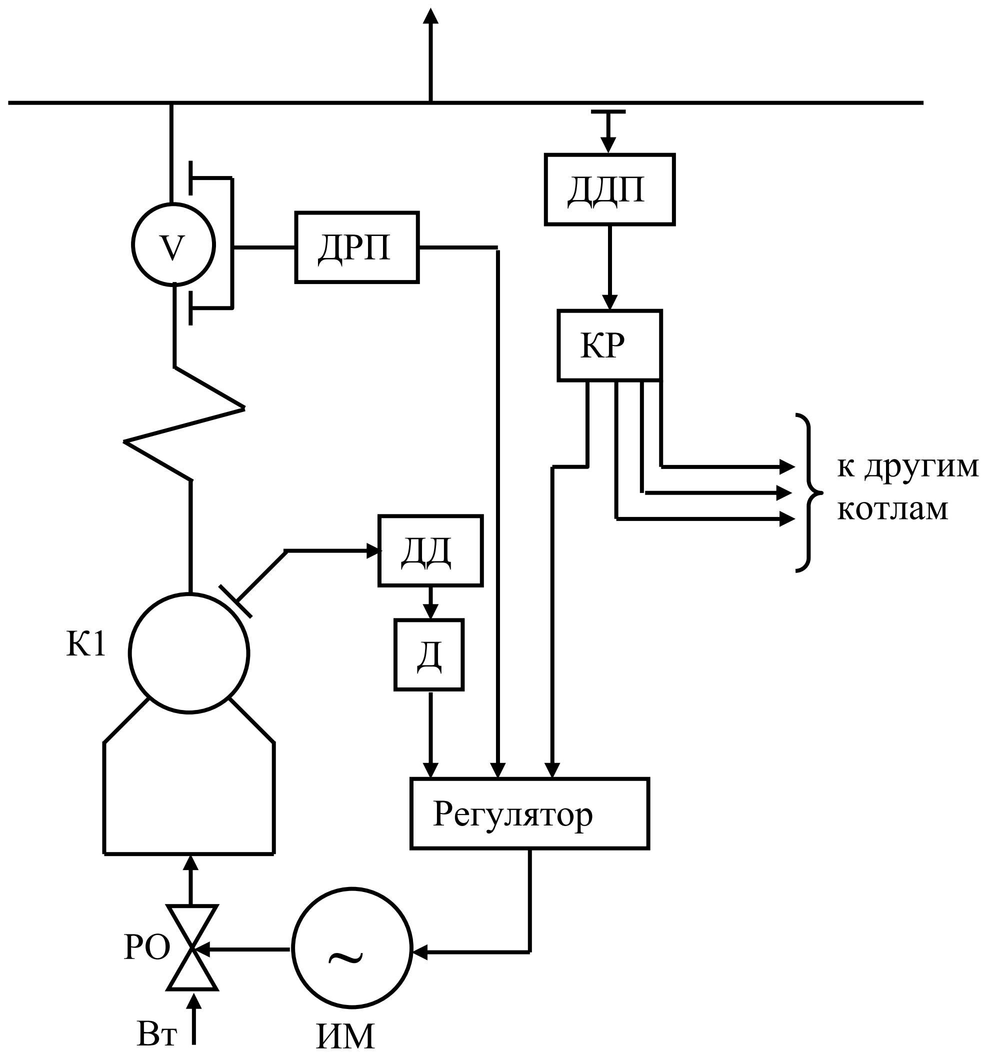
$Д_q$ – тепловая нагрузка, характеризующая тепловосприятие испарительной поверхности в единицу времени.

$Д_q = C_n \cdot \frac{dP_Б}{dt} + Д_Б$ – импульс по теплу

Д – дифференциатор

ДД – датчик по давлению в барабане котла;

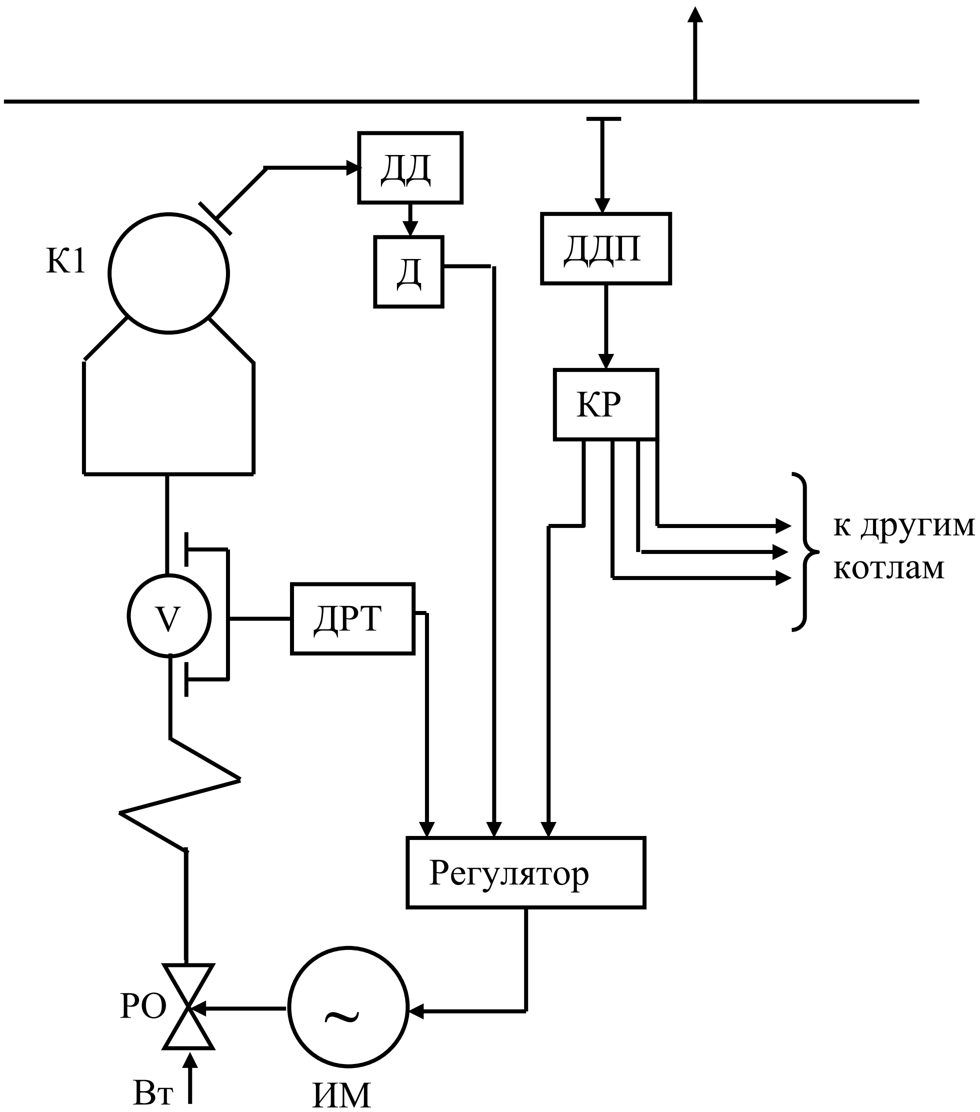
Быстродействие системы с импульсом по теплу увеличивается приблизительно 3-4 раза.



ДДП – датчик давления у потребителя;
КР – корректирующий регулятор;
ДРП – датчик расхода пара;

Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок.
Лекция 16.

Котлы работающие на жидком или газообразном топливе:



ДРТ – датчик расхода топлива.

АСР экономичности процесса горения

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

q_1 –
q_2 – потери тепла с уходом газа;
q_3 – потери тепла химического недажога;
q_4 – потери тепла механического недажога;
q_5 – потери тепла наружного охлаждения;
q_6 – потери тепла физического тепла шлока.

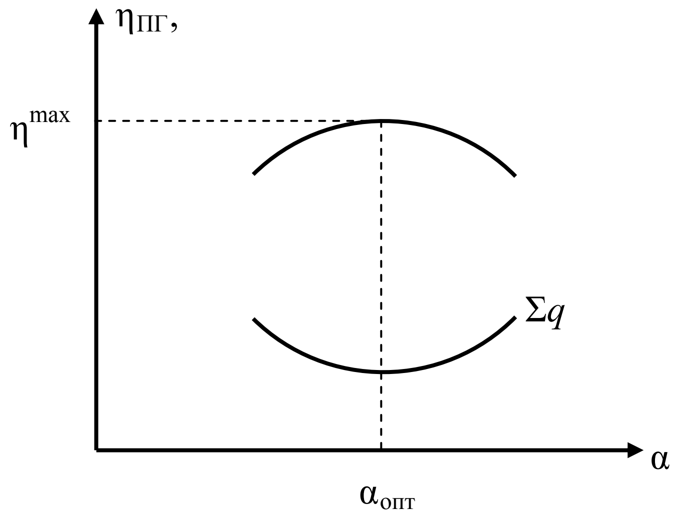
Потери тепла q_5 и q_6 мало зависят от режима работы топки определяются конструкцией котла, температурой наружного воздуха и т.д.

Потери тепла q_5 и q_6 определяются коэффициентом избытка воздуха в топке (α).

Таким образом можно сказать, что

$$\sum q_i = f(\alpha);$$

$$\eta_{ПГ} = f(\alpha).$$



для газа $\alpha = 1{,}1$;

для твердого топлива $\alpha = 1{,}25 \div 1{,}35$;

Регулирование экономичности работы парогенератора непосредственно по КПД или суммарной оценки потерь не получила широкого распространения из-за отсутствия надежных и точных способов, а также средств их непрерывного измерения. Одним из наиболее представительных способов экономичности является **анализ состава топочных газов**, покидающих топку. Как правило экономичность оценивают по кислороду или по углекислому газу.

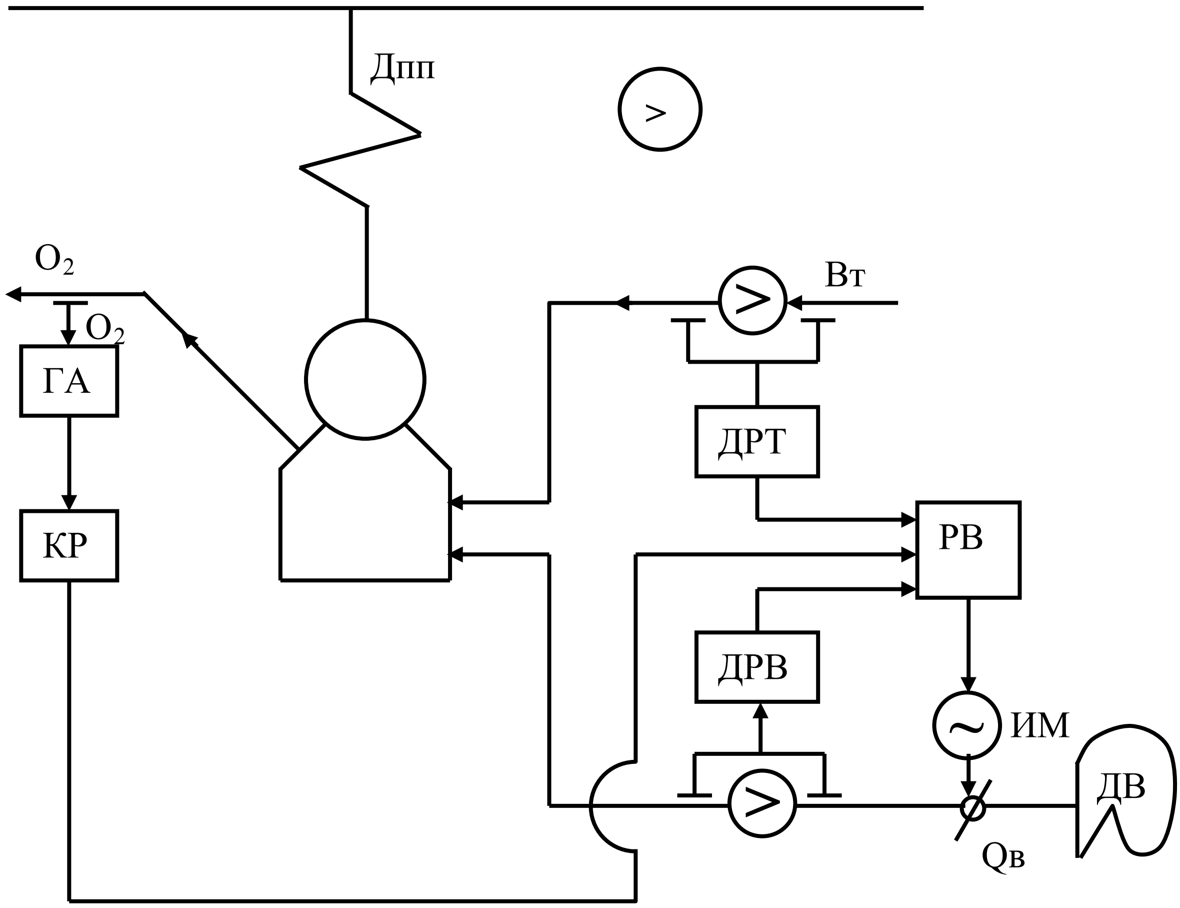
Наиболее предпочтительный способ регулирования по кислороду, поскольку:

1. Содержание в уходящих газах CO_2 в значительной мере зависит от вида (состава) топлива, в то время, как содержание O_2 для топлив разных видов мало отличается.
2. Контроль по CO_2 менее точен и надежен, т.к. в оптимальных условиях содержания его близко к максимальному и ощутимое отклонение избытка воздуха в газах от оптимального значения лишь незначительно сказывается на содержании этого компонента в газах.
3. Газоанализаторы CO_2 значительно инерционнее по сравнению с датчиками O_2.

Схемы регулирования для котлов работающих на жидком или газообразном топливе

Регулирование экономичности производится по схеме «топливо-воздух». в этом случае расход воздуха изменяется АСР пропорционально расходу сжигаемого топлива. Таким образом, обеспечивается простота и надежность регулирования экономичности процессов горения. при изменении качества жидкого или твердого топлива схема «топливо-воздух» дополняется корректирующим импульсом по содержанию свободного кислорода в дымовых газах.

«топливо-воздух»



ДРТ – датчик расхода топлива;
ДРВ – датчик расхода воздуха;
РВ – регулятор воздуха;
ИМ – исполнительный механизм;
ГА – газоанализатор;
КР – корректирующий регулятор;
ДВ – .

Расход топлива измеряется ДРТ, а расход воздуха ДРВ. Корректирующий сигнал по содержанию O_2 в уходящих газах формируется КР, который получает импульс от датчика кислорода ГА. Эти сигналы поступают в РВ, который в соответствии с сигналом небаланса воздействует на направляющий аппарат дутьевого вентилятора.

В тех случаях, когда невозможно измерить текущий расход топлива (твердого топлива), применяется схема регулирование экономичности по соотношению «тепло–воздух».