

# Моделирование динамических режимов ХТП

## Основные понятия

Под **управлением** понимают такую организацию процесса, которая обеспечивает достижение определённой цели. Автоматическое регулирование – более узкая задача. Под **регулированием** понимают частный случай управления, при котором технологические параметры поддерживаются на заданном значении с помощью специальных устройств – автоматических регуляторов.

Развитие промышленной автоматики началось лишь с конца XVIII века в эпоху промышленного переворота и было связано с появлением регуляторов И.И.Ползунова и Дж.Уатта. Общая же теория регуляторов была изложена в основном в 1868-1876г.г. в работах Максвелла и Вышнеградского. В этот же период был сформулирован алгебраический критерий устойчивости Рауса-Гурвица, а несколько позднее появились работы Стадолы, посвященные исследованию устойчивости ряда схем регулирования.

Большое значение для развития теории автоматического регулирования имели работы А.М.Ляпунова по устойчивости движения (1892), в которых впервые было дано точное определение устойчивости и обоснованы методы ее исследования.

Развитие и усложнение систем автоматики привело к созданию так называемых автоматизированных систем управления (АСУ).

В качестве основных отличительных черт АСУ можно отметить следующие:

- 1) Все АСУ содержат как обязательное звено в своей структуре человека, которому отводится главная роль в системе.
- 2) Все АСУ строятся по иерархическому принципу и имеют многоуровневую структуру. Каждый из уровней имеет определенную независимость, число взаимосвязей между уровнями минимально, причем при отказе внешнего контура АСУ нижняя ступень продолжает функционировать.
- 3) Сложность задач, решаемых иерархической АСУ, при переходе к более высокой ступени иерархии возрастает, а качество их решения и требования по надежности снижаются.

Сферы применения автоматических систем управления и регулирования очень разнообразны как по физической природе автоматизируемых объектов (различные технологические процессы, летательные аппараты, экономика и т.д.), так и по их сложности (начиная от простейшей системы регулирования уровня в баке до управления экономикой).

Однако принципы построения различных систем управления в значительной мере оказываются общими, независимо от того, рассматриваются ли системы управления технологическим процессом, ракетой или биологическим процессом. Эта общность принципов построения систем управления позволяет использовать при их исследовании и разработке одни и те же методы.

**Структурной схемой** (или блок-схемой) в автоматике называют такое условное изображение, в котором отдельные элементы системы представляют прямоугольниками, а связи между элементами изображают стрелками, показывающими направление передачи сигналов информации.

Степень детализации структурной схемы для одной и той же системы может быть различной в зависимости от назначения схемы. Основными элементами системы автоматического регулирования являются **объект и регулирующее устройство**.

Первый промышленный регулятор был изобретен в 1765 году И.И. Ползуновым для созданной им паровой машины. Принципиальная схема этого регулятора приведена на рис.1.а. Регулятор представляет собой поплавков, связанный системой рычагов с регулирующей заслонкой. Задачей регулирования здесь является поддержание в паровом котле постоянного уровня. При увеличении уровня поплавков поднимается вверх, в результате чего заслонка опускается, перекрывая трубопровод и уменьшая подачу воды в котел. При уменьшении уровня поплавков опускается, что приводит к увеличению подачи воды и

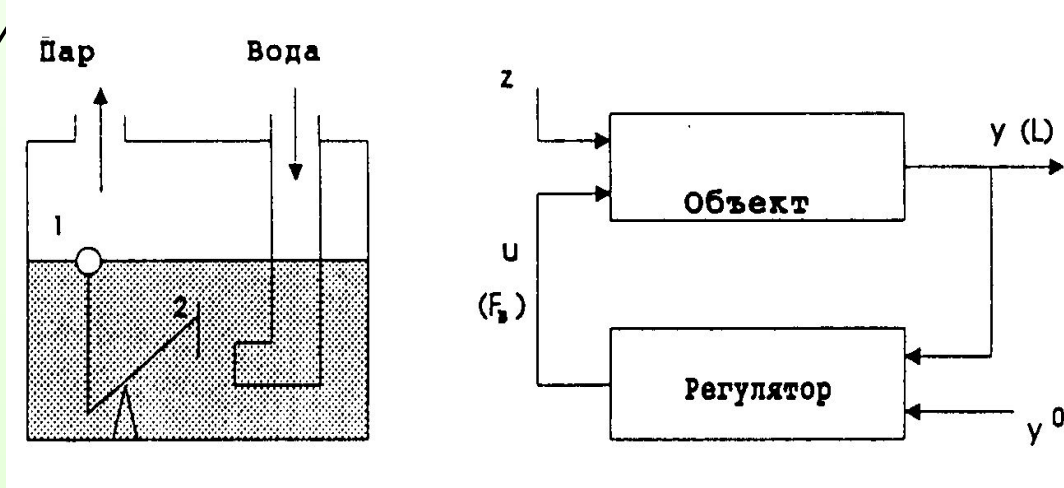


Рис.1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы системы регулирования уровня в паровом котле

Первый промышленный регулятор был изобретен в 1765 году И.И. Ползуновым для созданной им паровой машины. Принципиальная схема этого регулятора приведена на рис.1.а. Регулятор представляет собой поплавков, связанный системой рычагов с регулирующей заслонкой. Задачей регулирования здесь является поддержание в паровом котле постоянного уровня. При увеличении уровня поплавков поднимается вверх, в результате чего заслонка опускается, перекрывая трубопровод и уменьшая подачу воды в котел. При уменьшении уровня поплавков опускается, что приводит к увеличению подачи воды и

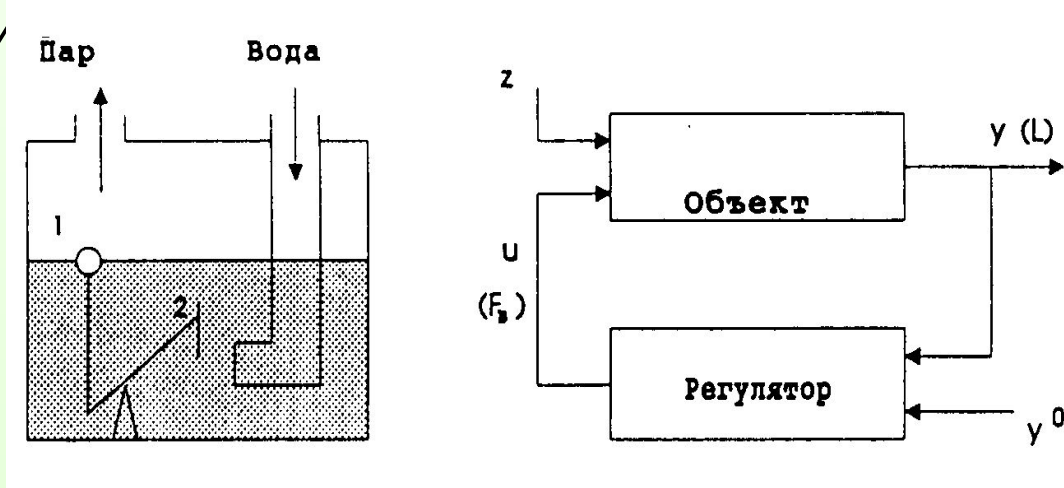


Рис.1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы системы регулирования уровня в паровом котле

В 1784 году Джеймсом Уаттом был сконструирован центробежный регулятор числа оборотов вала паровой машины (рис.2а). При изменении числа оборотов вала грузы под действием центробежной силы меняют свое положение, что приводит к перемещению регулирующего органа и изменению подачи пара. Это, в свою очередь, вызывает изменение числа оборотов, но в направлении, противоположном исходному.

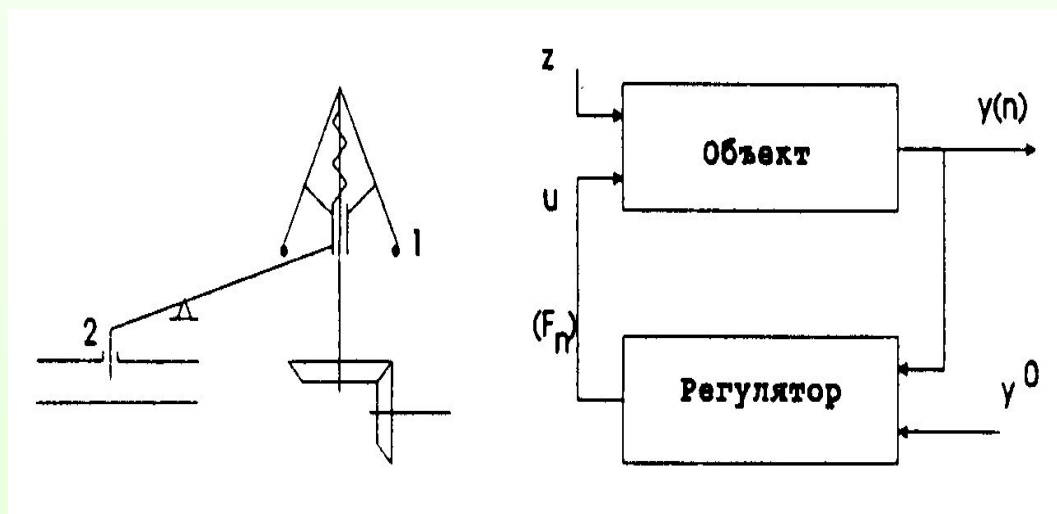


Рис.2. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы регулирования числа оборотов вала паровой машины



В рассмотренных примерах объектами регулирования являются паровой котел и паровая машина. К регулирующим устройствам относятся соответственно поплавки и центробежная муфта с регулирующими заслонками.

Регулируемые переменные  $y$  - выходные сигналы (или выходы) объекта, которые мы будем обозначать через  $y$ . Технологические параметры, от которых зависят выходные сигналы, называют входными сигналами (или **входами**) объекта. Среди входов различают возмущающие воздействия (или **возмущения**)  $z$ , которые вызывают отклонения регулируемой переменной от задания  $y_{зад}$ , и **регулирующие воздействия**  $u$ , служащие для поддержания регулируемой переменной на заданном значении. В данном случае регулирующие воздействия - подача воды в паровой котел и расход пара в паровую машину. К основным возмущениям можно отнести в одном случае - давление пара в котле, расход топлива и его теплотворную способность, в другом - нагрузку на валу паровой машины, давление пара в трубопроводе.

Необходимо отметить условность понятий "входных" и "выходных" сигналов, используемых в автоматике, и их отличие от входных и выходных потоков в технологических процессах.

Общий принцип, по которому построены регуляторы Ползунова и Уатта, состоит в том, что регулятор изменяет регулирующее воздействие при отклонении регулируемой координаты от заданного значения независимо от причин, вызвавших это отклонение. При этом входной сигнал объекта оказывается зависимым от его выходного сигнала.

Такая связь между выходом и входом объекта называется **обратной связью**. Поэтому рассмотренный принцип регулирования и называется **регулированием по обратной связи** или **регулированием по отклонению**. Системы регулирования, построенные по этому принципу, являются **замкнутыми системами** .

При разработке теории центробежных регуляторов хода машин французским ученым Понселе был предложен другой принцип регулирования - по нагрузке на валу машины, которая является одним из основных возмущений в объекте. В этом случае регулирующее воздействие вырабатывается регулятором в зависимости от величины возмущения, а не регулируемого параметра. Отсюда и название этого принципа регулирования - **регулирование по возмущению**. Системы регулирования по возмущению являются **разомкнутыми системами**, так как в них отсутствует обратная связь (рис.3).

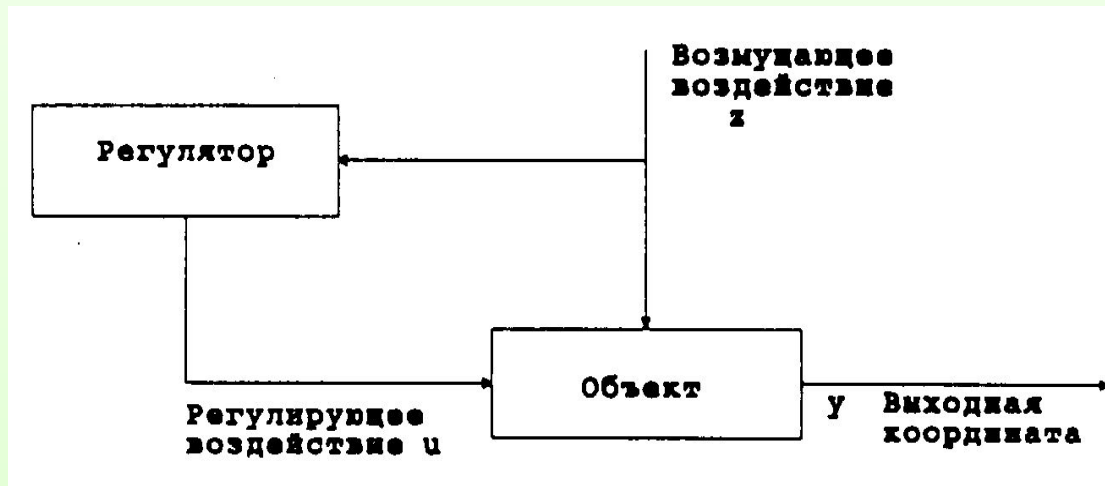


Рис.3. Структурная схема разомкнутой АСР

Идея этого способа регулирования проста: если можно компенсировать все возмущения, то регулируемая величина не будет отклоняться от заданного значения. Недостаток систем, построенных по принципу компенсации возмущений, очевиден: практически в крайне редких случаях удается компенсировать все возможные возмущения в объекте. Наличие нестабилизируемых возмущений, таких как колебания атмосферных условий, старение катализатора, закоксовывание печей, отложение солей в теплообменниках и т.п., приводит к отклонению регулируемого параметра от заданного значения.

Системы регулирования, построенные по принципу обратной связи не имеют этого недостатка, так как в этом случае регулятор стремится компенсировать отклонение регулируемого параметра от задания независимо от того, какими причинами вызвано это отклонение. Однако при регулировании по отклонению трудно одновременно выполнить условия точности, устойчивости и быстродействия систем. Так повышение точности и быстродействия часто приводит к тому, что система оказывается неработоспособной в силу

неустойчивости

Наиболее эффективными системами регулирования, получившими значительное распространение в технике, являются **комбинированные системы автоматического регулирования**, сочетающие оба рассмотренных принципа (рис.4).

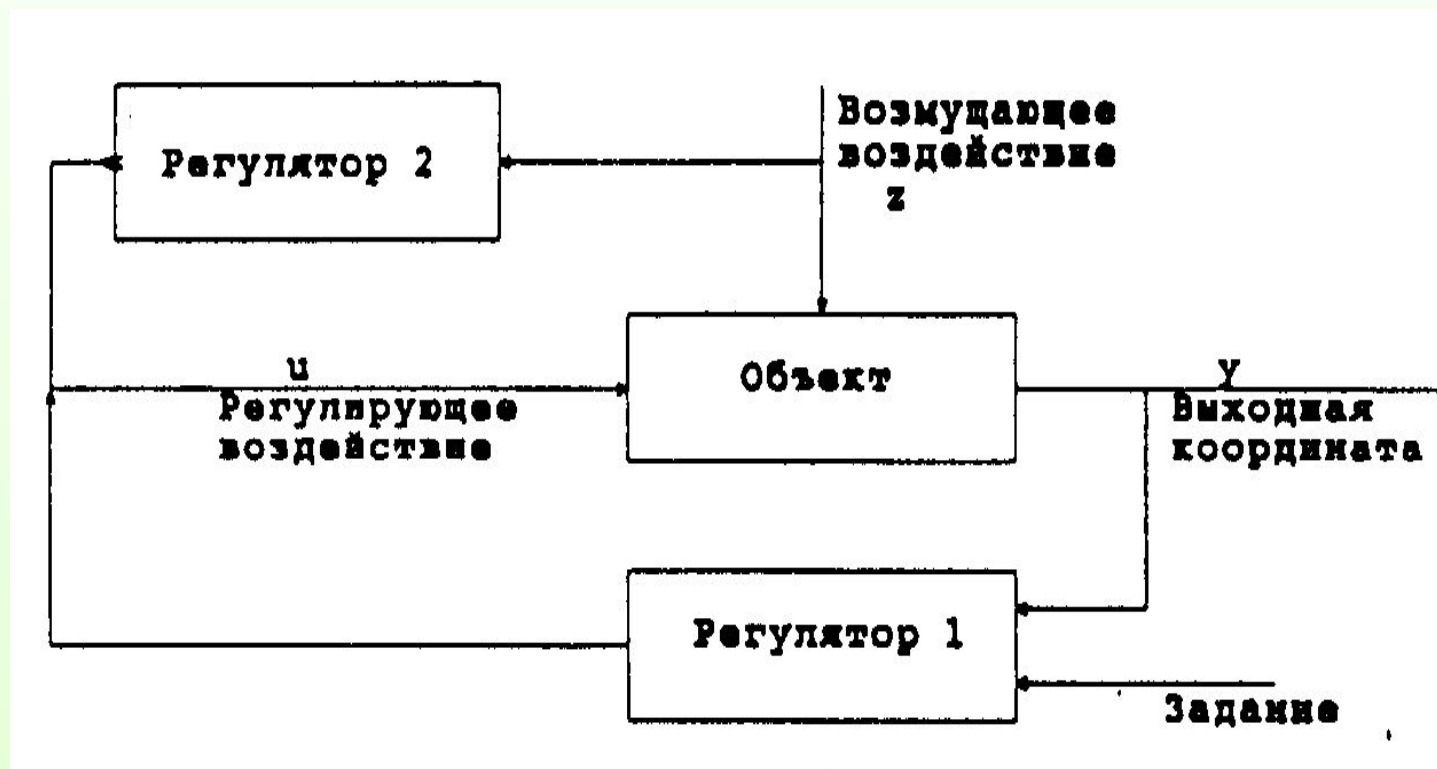


Рис. 4. Структурная схема комбинированной АСР

В зависимости от способа формирования сигнала задания различают три типа систем регулирования:

**системы стабилизации**, в которых заданное значение регулируемой координаты постоянно;

**системы программного регулирования**, в которых задание регулятору изменяется во времени по заранее заданной программе;

**следающие системы**, в которых задание регулятору изменяется в зависимости от какого-либо другого технологического параметра, т.е. регулируемая переменная "следит" за изменением этого параметра.

Помимо собственно объекта и регулятора в автоматических системах регулирования обычно можно выделить следующие составные элементы:

- **чувствительный элемент**, называемый первичным преобразователем, служащий для измерения текущего значения регулируемого параметра и выдачи соответствующего сигнала (например, термоэлектрические преобразователи для измерения температуры, сужающие устройства расходомеров, поплавки или буйки в измерителях уровня и т.п.);
- **усилительно-преобразовательное устройство**, предназначенное для преобразования одного вида энергии в другой и для усиления сигнала по мощности, необходимое для его передачи на расстояние;
  - **задающее устройство**, в котором формируется сигнал, соответствующий заданному значению регулируемой координаты;
  - **исполнительный механизм**, выполняющий роль преобразователя командного сигнала регулятора в



Рис.5. Структурная схема системы автоматического регулирования



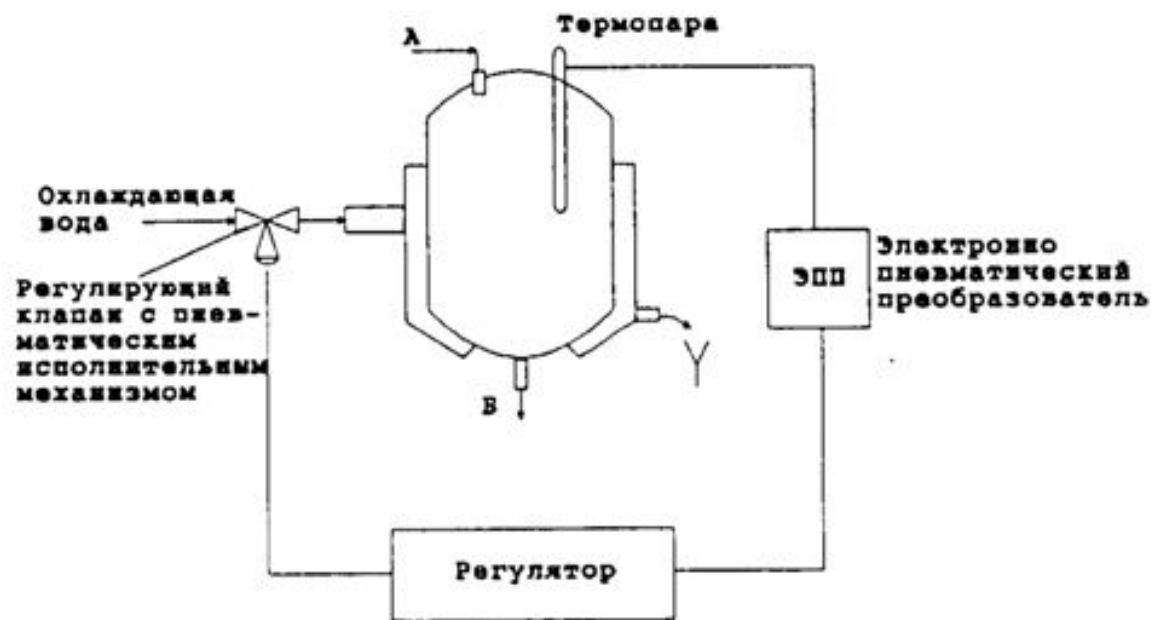


Рис.6. Принципиальная схема регулирования температуры в химическом реакторе

На рис. 6 показана принципиальная схема регулирования температуры в химическом реакторе за счет подачи охлаждающей воды в рубашку реактора.

Построение любой системы управления начинается с изучения объекта управления и составления его математического описания. Математическое описание объекта регулирования может быть получено экспериментальным, аналитическим или комбинированным, т.е. экспериментально-аналитическим методом. В первом случае уравнения объекта получают либо путем постановки специального эксперимента на объекте с последующей обработкой результатов эксперимента (метод активного эксперимента), либо статистической обработкой результатов длительной регистрации входных и выходных координат объекта в условиях его нормальной эксплуатации (метод пассивного эксперимента).

При аналитическом описании уравнения объекта получают на основе анализа физико-химических закономерностей протекающих в нем процессов. Экспериментально - аналитический путь получения математического описания объектов подразумевает составление уравнений аналитическим методом с последующим определением коэффициентов этих

Уравнения **статики** описывают установившийся режим, при котором все координаты объекта остаются неизменными во времени, т.е. объект находится в состоянии равновесия. Уравнения статики представляют собой алгебраические (трансцендентные) уравнения или дифференциальные уравнения, содержащие производные по какому-либо параметру, кроме времени (например, по пространственной координате).

Уравнения **динамики** описывают неустановившийся, или переходный режим, в котором выходная координата объекта изменяется во времени. В общем случае уравнения динамики являются дифференциальными уравнениями, содержащими производные по времени.

В зависимости от конкретного вида уравнений математического описания все объекты регулирования подразделяются на несколько классов по следующим признакам:

- по виду производных - на объекты с **сосредоточенными параметрами** (координатами), которые описываются уравнениями

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = f(X, Y, a), \quad i = \overline{1, n}, \quad (B.1)$$

где  $X$  - векторы входных, выходных координат в параметров объекта;  $n$  - число элементарных процессов, определяющих размерность вектора  $Y$  и порядок системы уравнений (B.1).

- и объекты с **распределенными параметрами** (по пространственной координате), для которых справедливы уравнения

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + v \frac{\partial Y_i}{\partial l} = f_i(X, Y, a), \quad i = \overline{1, n}, \quad (B.2)$$

где  $v$  - линейная скорость,  $l$  - пространственная

- по типу функций в правой части уравнений - на **линейные** и **нелинейные** объекты;
- по характеру параметров - на **стационарные** объекты, у которых коэффициенты дифференциальных уравнений, определяемые физико-химическими свойствами и конструкционными параметрами, - постоянны, и на **нестационарные** объекты, свойства которых изменяются со временем, вследствие чего и параметры дифференциальных уравнений являются функциями времени. Уравнения статики, соответствующие уравнениям (B.1) и (B.2) получают приравниванием нулю производных по време

$$f_i(X, Y, a) = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (B.3)$$

или

$$v \frac{Y_i}{l} = f_i(X, Y, a), \quad i = \overline{1, n} \quad (B.4)$$

Характер производных в дифференциальных уравнениях объекта и порядок системы уравнений в значительной мере определяют сложность объекта управления, которая не всегда совпадает с его конструктивной сложностью. Эти особенности математической модели объекта однозначно связаны с его **числом степеней свободы**, которое равно наименьшему числу независимых переменных, однозначно определяющих состояние объекта в каждый момент времени.

Так, для того, чтобы задать положение точки в пространстве, необходимо знать три ее координаты (система обладает тремя степенями свободы); для задания положения точки на плоскости достаточно значений двух координат (система имеет две степени свободы).

Процесс, происходящий в химическом реакторе, может быть охарактеризован давлением, температурой и концентрацией продуктов в нем. Однако, если значения некоторых из этих параметров однозначно определяются величинами других, то не все параметры являются необходимыми для характеристики состояния объекта. Так, если процесс в реакторе полностью характеризуется давлением в нем (или только температурой, или только концентрацией) и оно одинаково во всех точках аппарата, то такой реактор является объектом с одной степенью свободы и описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка.

Таким образом, объекты с сосредоточенными параметрами имеют конечное число степеней свободы, определяющее порядок дифференциального уравнения. Объекты с распределенными параметрами имеют бесконечное число степеней свободы. Например, для характеристики состояния трубчатого реактора в каждый момент времени требуется задать его температуру (и концентрацию) в каждом сечении аппарата, т.е. задать функции

Коэффициенты дифференциальных уравнений объектов управления (вектор  $a$ ) в общем случае представляют собой комплексы, в которые могут входить физико-химические константы, конструкционные и режимные параметры. Для объектов, свойства которых не изменяются во времени (**стационарные объекты**), коэффициенты уравнений будут константами. Для **нестационарных объектов**, свойства которых изменяются со временем (например, вследствие старения падает активность катализатора или уменьшается коэффициент теплопередачи из-за образования накипи на теплообменных поверхностях), коэффициенты дифференциальных уравнений оказываются переменными, зависящими от времени.

Большинство технологических объектов являются нестационарными, однако скорость изменения их свойств намного меньше, чем скорость процессов регулирования этих объектов. Так, например, время регулирования температуры в реакторе может составлять несколько минут, а время одного цикла работы катализатора - несколько месяцев. Такие объекты можно приближенно рассматривать как стационарные в течение определенного промежутка времени (называемого периодом



Статические характеристики объектов отражают связь между входными и выходными координатами в установившихся режимах. Для объектов с несколькими входами и выходами эти характеристики представляют собой многомерные поверхности в пространстве описываемые уравнениями статики объекта. В простейшем случае для объекта с одним входом, одним выходом статической характеристикой является функция в общем случае нелинейная.

Основным показателем статической характеристики объекта с сосредоточенными параметрами является **коэффициент усиления** который равен производной от функции, описывающей статическую характеристику.

Очевидно, что для объектов с нелинейными характеристиками коэффициент усиления зависит от входной координаты, т.е. является переменной величиной (рис.5).

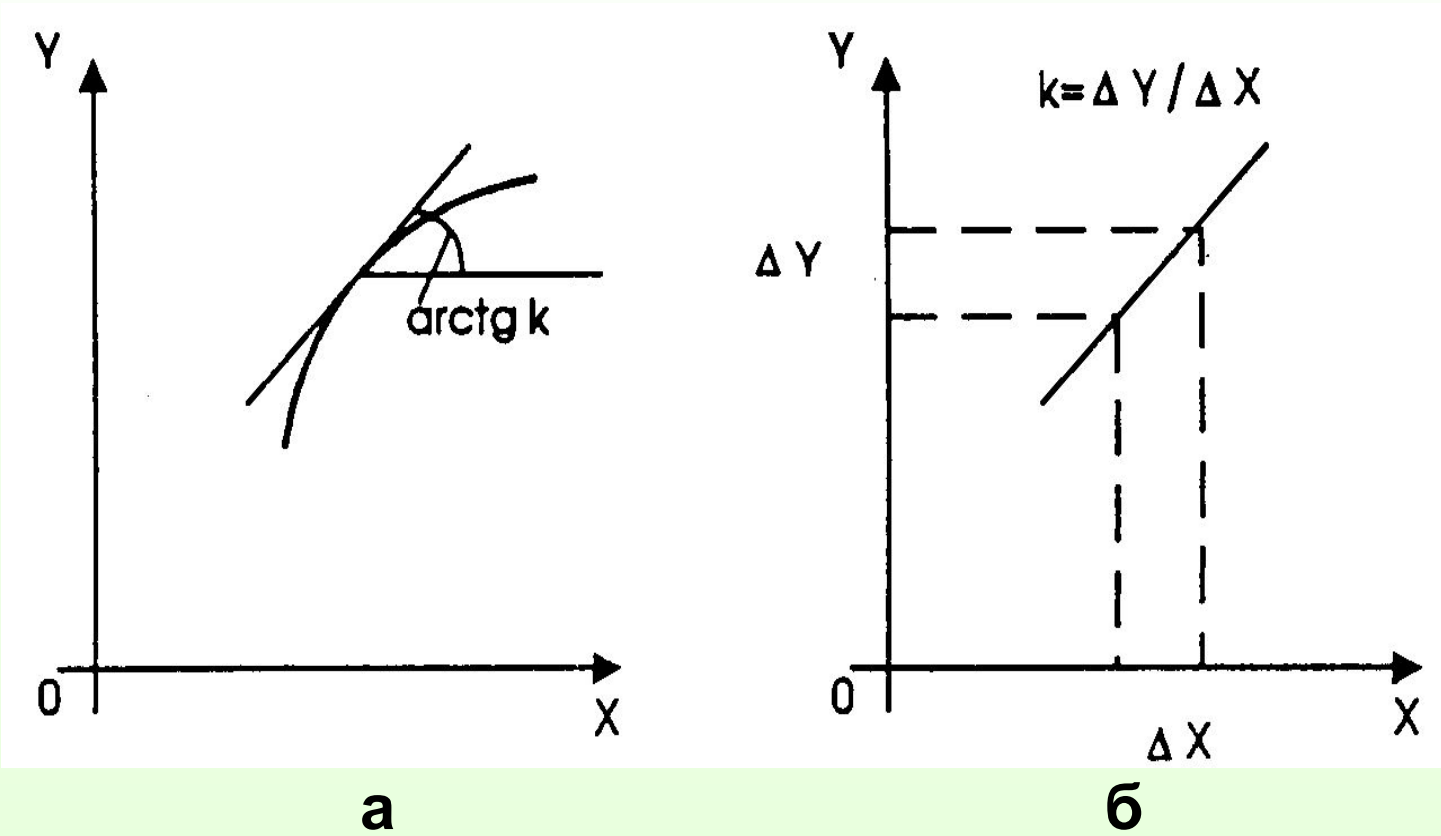


Рис.5. Статические характеристики нелинейных (а) и линейных (б) объектов

Для характеристики динамических свойств линейных объектов широко используются переходные процессы, соответствующие типовым входным сигналам. Наиболее распространенными из них являются **кривая разгона** и **импульсная переходная функция**.

Кривая разгона (или переходная функция) - это реакция объекта на входной сигнал в виде ступенчатой функции единичной амплитуды называемой функцией Хевисайда (рис.6).

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

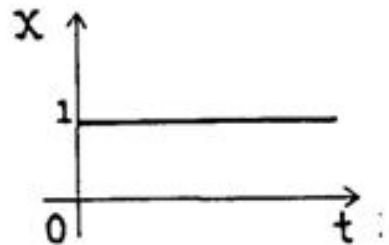


Рис.5. Единичная ступенчатая функция

Уравнение кривой разгона может быть получено как решение дифференциального уравнения для  $t > 0$  при постоянной правой части и нулевых начальных условиях

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 \quad (1.5)$$

Обычно кривая разгона объекта определяется экспериментальным путем и используется как исходные данные для расчета системы автоматического регулирования данного объекта.

Рассмотрим для примера снятие кривой разгона гидравлической емкости (см.рис.1.5.). Предположим, что объект находится в состоянии равновесия при определенных значениях уровня  $L^0$  и расходов  $F_1^0 = F_2^0$ . Подадим на вход объекта ступенчатое возмущение на притоке жидкости, т.е., уменьшив резко степень открытия входного клапана, изменим скачком расход от  $F_1^0$  до  $F_1^1$ . В результате нарушения материального баланса уровень в емкости начнет уменьшаться, что приведет к снижению напора на гидравлическом сопротивлении и, следовательно, к уменьшению расхода  $F_2$  до значения  $F_2^1 = F_1^1$ . По окончании переходного процесса уровень установится на новом значении  $L^1$ .

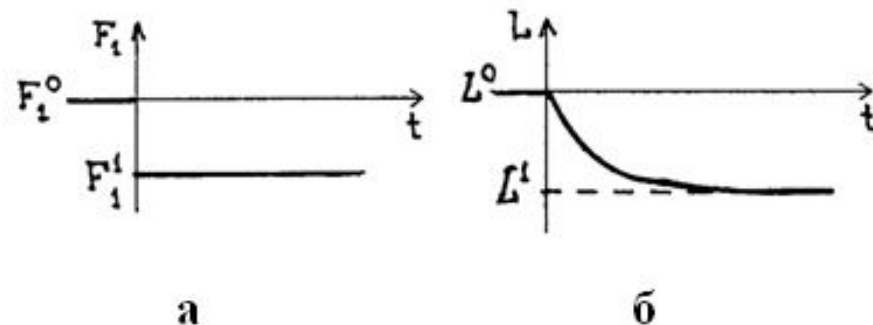


Рис.1.5. Графики ступенчатого возмущения (а) и кривой разгона (б)

Импульсная переходная функция  $g(t)$ , называемая также **весовой функцией**, показывает реакцию объекта на единичный мгновенный импульс  $\delta(t)$ , называемый дельта-функцией или **функцией Дирака**.

Дельта-функцией  $\delta(t - t_0)$  называется функция, удовлетворяющая следующим условиям:

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq t_0 \\ \infty, & \text{при } t = t_0 \end{cases}; \quad (1.6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.7)$$

Таким образом, дельта-функция представляет собой импульс бесконечно малой длительности и бесконечно большой амплитуды (рис.1.6 а).

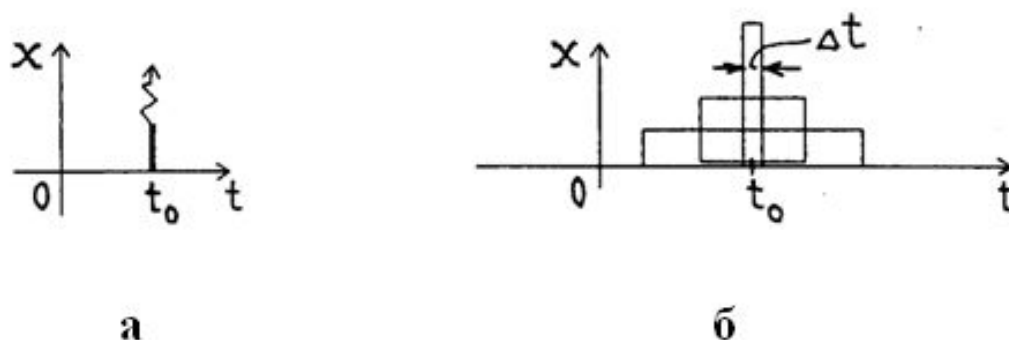


Рис.1.6. График дельта-функции (а) ее аппроксимация (б)



Такую функцию можно представить как предел, к которому стремится прямоугольный импульс с основанием  $\Delta t$  и с площадью равной единице (рис.1.6б), если основание импульса уменьшать ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) так, чтобы площадь импульса сохранялась равной единице.

Физической моделью мгновенного импульса может служить изменение ускорения при соударении абсолютно твердых тел, когда в момент удара скачком меняются скорости обоих тел. При этом ускорение тела представляет собой мгновенный импульс бесконечно большой амплитуды, а площадь импульса является конечной величиной, определяемой изменением количества движения тела.

Дельта-функция обладает замечательным свойством: интеграл от произведения какой-либо функции  $x(t)$  на дельта-функцию, поданную в момент  $t_0$ , равен значению функции в этот момент времени  $x(t_0)$ .

В теории автоматического регулирования широко используется специальный метод прикладного анализа, в основе которого лежит функциональное преобразование Лапласа.

Преобразованной по Лапласу функцией называется функция комплексного переменного, определяемая соотношением:

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt, \quad (1.11)$$

где  $x(t)$  - исходная функция действительного переменного  $t$ , называемая оригиналом;

$p$  - комплексная переменная,  $p = \alpha + i\omega$ ;

$\alpha, \omega$  - действительные переменные,  $i = \sqrt{-1}$ .



Функция  $x(p)$  называется изображением по Лапласу функции  $x(t)$  и записывается в виде:  $x(p) = L\{x(t)\}$ , где  $L$  - символ преобразования Лапласа. Обратный переход от изображения к оригиналу осуществляется по формуле:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} x(p) e^{pt} dp, \quad (1.12)$$

где  $c$  - абсцисса сходимости функции  $x(t)$  [3].

Для большого числа функций, встречающихся на практике, составлены таблицы соответствия между оригиналами и изображениями, значительно облегчающие применение преобразования Лапласа.

Одной из основных динамических характеристик объекта, широко используемой в теории автоматического регулирования, является **передаточная функция**.

Передаточной функцией объекта называется отношение преобразованного по Лапласу выхода объекта  $y(p)$  к преобразованному по Лапласу входу  $x(p)$ .

Следовательно, передаточная функция является функцией комплексного переменного. Она обозначается  $W(p)$ :

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} \quad (1.16)$$

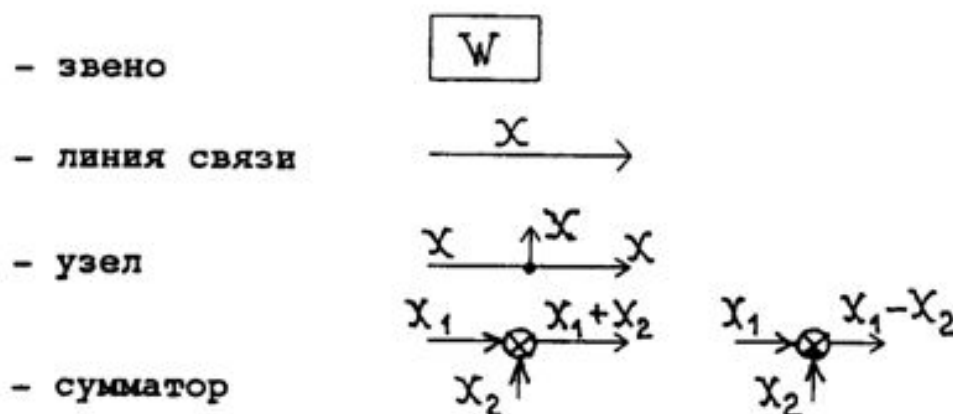
Передаточная функция характеризует динамику объекта по определенному каналу, связывающему конкретный вход объекта с выходом. Если в объекте имеется несколько входов, то каждому каналу связи будет соответствовать своя передаточная функция.

При составлении структурной схемы объект условно разбивается на отдельные элементы, называемые звеньями, которые описываются достаточно простыми зависимостями.

Точка на линии связи, в которой происходит разветвление линии (т.е. один в тот же сигнал подается на входы нескольких звеньев), называется **узлом**.

Алгебраическое сложение нескольких сигналов изображается в виде круга на линии связи, называемого **сумматором**. В упрощенных структурных схемах сумматоры иногда не показываются, а суммируемые сигналы подаются на вход соответствующего звена.

Приведем условное изображение основных элементов структурных схем:





Любая сложная структурная схема может быть изображена с помощью трех основных типов соединений:

- параллельное соединение;
- последовательное соединение;
- соединение с обратной связью.

### Параллельное соединение звеньев

Структурная схема представлена на рис.1.12. При параллельном соединении входные сигналы всех звеньев одинаковы и равны входу системы  $x(p)$ , а общий выход системы  $y(p)$  равен сумме выходов отдельных звеньев.

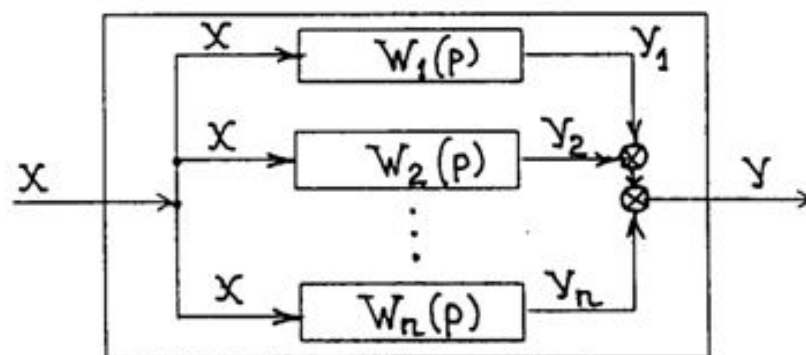


Рис.1.12. Структурная схема системы с параллельным соединением звеньев

Запишем уравнения выходных координат каждого звена:

$$y_j(p) = x(p)W_j(p), \quad j = \overline{1, n}$$

Выход всей системы будет равен

$$y(p) = \sum_{j=1}^n y_j(p) = x(p) \sum_{j=1}^n W_j(p),$$

откуда передаточная функция системы получается в виде:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \sum_{j=1}^n W_j(p)$$

Таким образом, передаточная функция системы параллельного соединения звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев.

Таким образом, передаточная функция системы параллельного соединения звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев.

Примером технологического объекта, имеющего параллельную структуру, может служить цепочка параллельно работающих однотипных реакторов (рис.1.13). Сырье для реакторов поступает из общего коллектора, т.е. имеет одинаковую концентрацию  $c_0$ . В результате реакции в каждом аппарате образуется продукт определенного состава, который зависит от условий реакции в данном аппарате. Продукты реакции из всех аппаратов собирают в общий сборник, в котором происходит смешение. Таким образом, состав продукта в сборнике равен сумме взвешенных (т.е. взятых с различными коэффициентами) концентраций продуктов отдельных реакторов.



Рис. 1.13. Пример технологического объекта с параллельной структурой

## Последовательное соединение звеньев

При последовательном соединении выход предыдущего звена подается на вход последующего (рис.1.14).

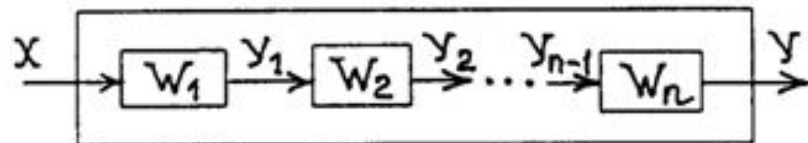


Рис.1.14. Структурная схема последовательного соединения звеньев

Уравнения для отдельных звеньев имеют вид:

$$y_1(p) = x(p)W_1(p)$$

$$y_j(p) = y_{j-1}(p)W_j(p) \quad j = \overline{2, n} \quad (1.19)$$



С учетом того, что выходное звено является выходом всей системы, передаточная функция системы будет равна

$$W(p) = \frac{y_n(p)}{x(p)} = \prod_{j=1}^n W_j(p) \quad (1.20)$$

Таким образом, передаточная функция системы последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев.

Однако необходимо отметить, что это соотношение справедливо лишь в том случае, если передаточная функция каждого звена не изменяется от его включения последовательно с другим звеном, т.е. выход каждого звена зависит только от его входа и не зависит от последующего звена. Такие звенья называются **детектирующими**, т.е. они пропускают сигнал по цепочке звеньев только в одном направлении: от входа к выходу.



Звено, выход которого зависит не только от его входа, но и от выходной координаты последующего звена, называется **недетектирующим**. Очевидно, что уравнения такого звена будут различными в зависимости от того, рассматривается оно изолированно или в последовательном соединении с другими звеньями.

## Соединение с обратной связью.

Обратной связью называют передачу сигнала с выхода звена на его вход (рис.1.16), где сигнал обратной связи  $x_{oc}$  суммируется с внешним сигналом  $x$ . Причем, если суммарный сигнал  $x_1$  определяется соотношением  $x_1 = x + x_{oc}$ , то обратная связь называется *положительной*; если же  $x_1 = x - x_{oc}$ , т.е. сигнал обратной связи вычитается из внешнего сигнала, то обратная связь называется *отрицательной*.

В линии обратной связи в общем случае может быть включено звено, в котором выходной сигнал  $y$  преобразуется в соответствии с передаточной функцией  $W_{oc}(p)$  в сигнал  $x_{oc}$ . Иногда это звено может отсутствовать, т.е.  $W_{oc}(p) = 1$  и  $x_{oc} = y$ .

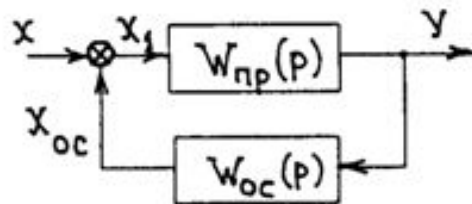


Рис. 1.16. Структурная схема системы с обратной связью

Найдем соотношение между передаточной функцией замкнутой системы  $W_{zc}(p)$  и передаточными функциями отдельных звеньев  $W_{np}(p)$  и  $W_{oc}(p)$ . Для этого запишем уравнения для каждого звена и сумматора:

$$y(p) = x_1(p)W_{np}(p)$$

$$x_{oc}(p) = y(p)W_{oc}(p) \quad (1.21)$$

$$x_1 = x + x_{oc}$$

Исключив из полученной системы уравнений  $x_1(p)$  и  $x_{oc}(p)$ , найдем общее уравнение системы в виде:

$$y(p) = x(p)W_{np}(p) + y(p)W_{np}(p)W_{oc}(p) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y(p)[1 - W_{np}(p)W_{oc}(p)] = x(p)W_{np}(p)$$

откуда получим формулу для передаточной функции замкнутой системы:

$$W_{xc}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{W_{np}(p)}{1 - W_{np}(p)W_{oc}(p)} \quad (1.22)$$

Заметим, что формула (1.22) выведена для случая положительной обратной связи. Аналогичный вывод для отрицательной обратной связи дает:

$$W_{xc}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_{np}(p)W_{oc}(p)} \quad (1.23)$$

Если на вход линейного объекта подавать гармонический сигнал, например, вида  $x(t) = A \sin(\omega t)$ , то на выходе его в установившемся режиме получим также гармонический сигнал, частота которого равна частоте входных колебаний, а амплитуда и фаза будут отличаться от амплитуды и фазы входного сигнала, т.е.  $y_{\text{вх}}(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$  (рис.1.27).



$$X = A \sin(\omega t + \varphi_x) \xrightarrow{\text{ОБЪЕКТ}} Y_{\text{ВЫН}} = B \sin(\omega t + \varphi_y)$$

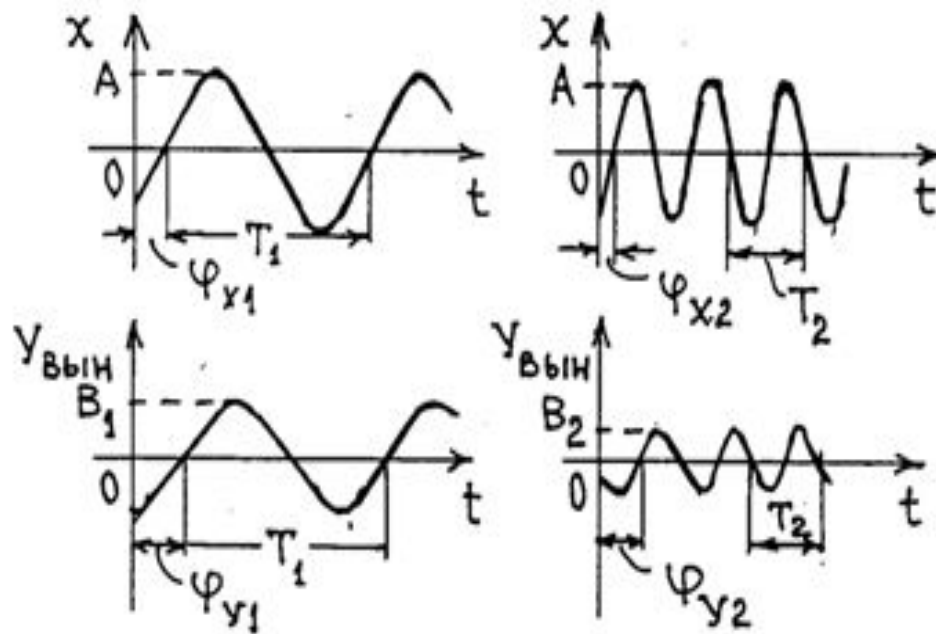


Рис.1.27. Иллюстрация к экспериментальному определению частотных характеристик объекта

Степень различия между параметрами входных и выходных гармонических сигналов не зависит от амплитуды и фазы входного сигнала, а определяется только динамическими свойствами самого объекта и частотой колебаний. Поэтому в качестве динамических характеристик объекта могут быть использованы так называемые **частотные характеристики**: амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) -  $M(\omega)$ , фазочастотная характеристика (ФЧХ) -  $\varphi(\omega)$  и амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) -  $W(i\omega)$ .

## Типовые детектирующие звенья линейных систем

Реальные промышленные объекты регулирования обычно являются весьма сложными системами. Однако в ряде случаев при их исследовании можно не учитывать нелинейные свойства этих объектов и распределенность параметров, т.е. рассматривать их как линейные динамические системы с сосредоточенными параметрами. При таком упрощении любой объект может быть представлен как сочетание определенным образом связанных между собой простейших детектирующих звеньев. В линейной теории автоматического управления выделяют следующие типовые звенья:

- усилительное звено;
- интегрирующее звено;
- апериодическое звено первого порядка;
- дифференцирующее звено;
- звенья второго порядка:
  - а) апериодическое; б) колебательное;
- звено чистого запаздывания.



## Устойчивость линейных систем.

Под устойчивостью понимают способность системы восстанавливать состояние равновесия после снятия внешнего возмущающего воздействия.

Различают три типа систем:

*устойчивые системы* - системы, которые, будучи выведены из состояния равновесия внешним возмущением, после снятия этого возмущения возвращаются в исходное состояние равновесия;

*нейтральные системы* - системы, которые после снятия возмущения приходят в состояние равновесия, отличное от исходного;

*неустойчивые системы* - такие системы, в которых не устанавливается равновесие после снятия возмущения.

Простейшие модели этих систем показаны на рис.3.1.

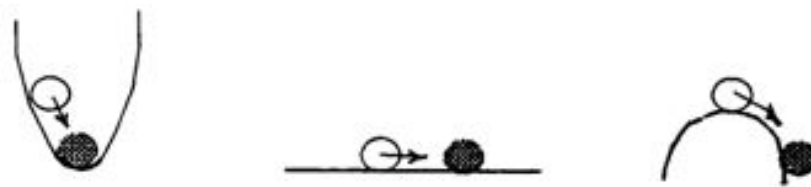


Рис.3.1. Иллюстрация понятия устойчивости систем

Примером неустойчивого объекта может служить химический реактор, в котором протекает экзотермическая реакция. Такой реактор можно рассматривать как объект с положительной обратной связью, так как при повышении температуры скорость реакции возрастает, что, в свою очередь, приводит к увеличению теплоты реакции и росту температуры.

## Типовые законы регулирования

Законом регулирования называется уравнение, описывающее зависимость между входом регулятора ( $y(t) - y^0$ ) и его выходом  $u(t)$  (рис.5.1).

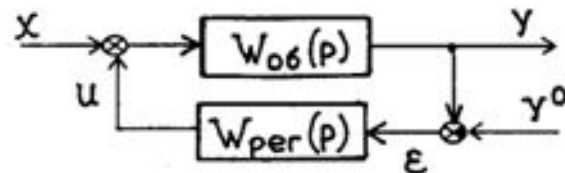


Рис.5.1. Структурная схема замкнутой АСР

В промышленных регуляторах реализуются следующие типовые законы регулирования:

- пропорциональный (П) ;
- интегральный (И);
- пропорционально-интегральный (ПИ);
- пропорционально-дифференциальный (ПД);
- пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).



**Пропорциональный закон регулирования** описывается уравнением

$$u(t) = -C_1 |y(t) - y^0|, \quad (5.1)$$

где  $C_1$  - параметр настройки регулятора;  $y^0$  - заданное значение регулируемой координаты объекта, а знак (-), как и во всех остальных законах регулирования, учитывает тот факт, что регулятор включается в систему по принципу отрицательной обратной связи.

Уравнение регулятора, так же как и объекта, записывается в отклонениях от установившихся значений координат, следовательно, отрицательный знак у выхода регулятора означает, что изменение регулирующего воздействия должно быть направлено на компенсацию отклонения регулируемой координаты объекта, т.е. знак  $u(t)$  должен быть противоположным знаку рассогласования  $|y(t) - y^0|$ .

Как видно из уравнения (5.1) пропорциональным регулятором служит усилительное звено с переменным коэффициентом усиления  $C_1$ , включенное в отрицательную обратную связь к объекту.

Динамические характеристики П-регулятора, в основном, совпадают с характеристиками усилительного звена и имеют следующий вид (рис.5.2):

- передаточная функция:  $W(p) = -C_1$ ;

- частотные характеристики:  $W(i\omega) = -C_1 = C_1 e^{i\pi}$ ;

$$M(\omega) = C_1; \quad \varphi(\omega) = \pi; \quad (5.2)$$

- кривая разгона  $u(t) = -C_1 \cdot 1(t)$ .

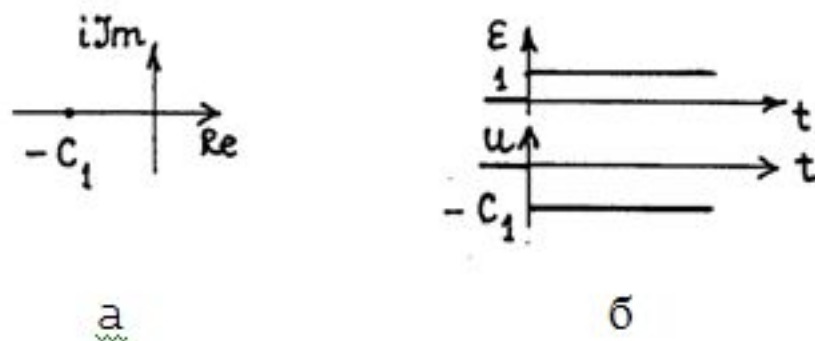


Рис.5.2. Динамические характеристики П-регулятора: а - АФХ; б - кривая разгона

Как видно из уравнения (5.1) пропорциональным регулятором служит усилительное звено с переменным коэффициентом усиления  $C_1$ , включенное в отрицательную обратную связь к объекту.

Динамические характеристики П-регулятора, в основном, совпадают с характеристиками усилительного звена и имеют следующий вид (рис.5.2):

- передаточная функция:  $W(p) = -C_1$ ;

- частотные характеристики:  $W(i\omega) = -C_1 = C_1 e^{i\pi}$ ;

$$M(\omega) = C_1; \quad \varphi(\omega) = \pi; \quad (5.2)$$

- кривая разгона  $u(t) = -C_1 \cdot 1(t)$ .

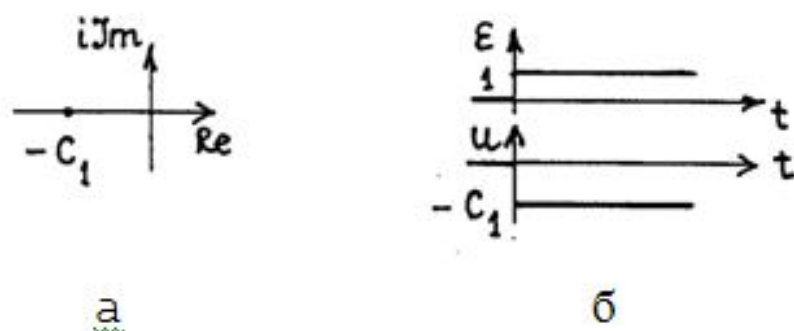


Рис.5.2. Динамические характеристики П-регулятора: а - АФХ; б - кривая разгона



**Интегральный закон регулирования** описывается уравнением

$$u(t) = -C_0 \int_0^t [y(\lambda) - y^0] d\lambda \quad \text{или} \quad u'(t) = -C_0 [y(t) - y^0], \quad (5.4)$$

где  $C_0$  - параметр настройки регулятора. Очевидно, что интегральным регулятором служит интегрирующее звено с настраиваемой постоянной интегрирования  $1/C_0$ , включенное в отрицательную обратную связь к объекту.

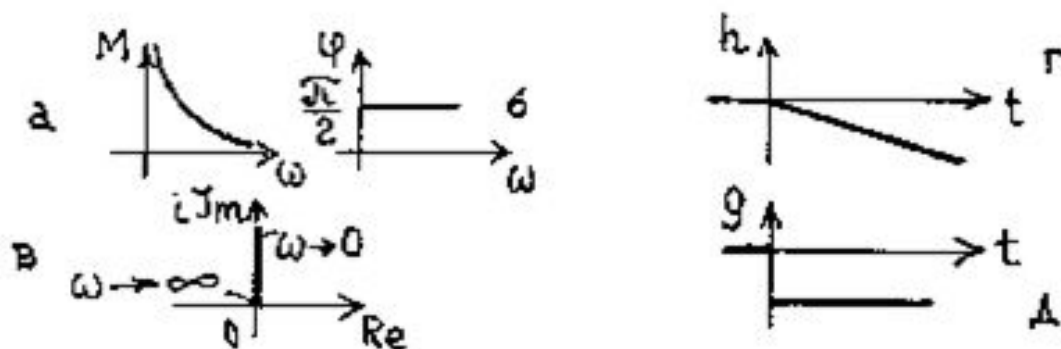


Рис.5.3.Динамические характеристики И-регулятора:  
 а-АЧХ; б-ФЧХ; в-АФХ; г-кривая разгона; д-ИПФ



Динамические характеристики И-регулятора имеют вид (рис.5.3):

- передаточная функция  $W(p) = -C_0 / p$  ;

- частотные характеристики:

$$W(i\omega) = -\frac{C_0}{i\omega} = \frac{C_0}{\omega} e^{i\frac{\pi}{2}} \Rightarrow M(\omega) = \frac{C_0}{\omega}; \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} \quad (5.5)$$

- переходные функции;

- кривая разгона  $u(t) = -C_0 t$  ;

- ИПФ  $u(t) = -C_0 \cdot$

*Дифференциальный закон регулирования* описывается уравнением

$$u(t) = -C_2 y'(t), \text{ где } C_2 - \text{ параметр настройки. (5.6)}$$

Уравнение (5.6) является уравнением идеального дифференцирующего звена, поэтому на практике дифференциальный закон может быть реализован лишь приближенно в определенном интервале частот.

Чисто дифференциальный регулятор неприменим для регулирования, так как при любом постоянном значении регулируемой величины (т.е. при любой статической ошибке регулирования) выходной сигнал такого регулятора равен нулю.

Дифференциальная составляющая вводится в закон регулирования для того, чтобы увеличить быстродействие регулятора, так как в этом случае он реагирует не только на значение регулируемого параметра, но и на скорость его изменения. Благодаря этому достигается как бы "предваряющий" эффект регулирования, при котором удается снизить динамическую ошибку по сравнению с регуляторами без предварения.

Рассмотрим динамические характеристики Д-закона регулирования:

- передаточная функция  $W(p) = -C_2 p$
- частотные характеристики (рис. 5.4):
- кривая разгона  $u(t) = -C_2 \delta(t)$

$$W(i\omega) = -C_2 i \omega = C_2 \omega e^{i \frac{3\pi}{2}} \Rightarrow M(\omega) = C_2 \omega, \quad \varphi(\omega) = \frac{3\pi}{2} \quad (5.7)$$

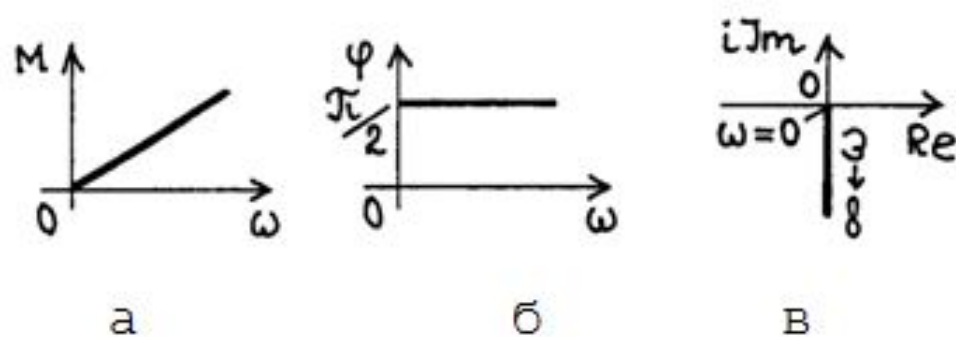


Рис.5.4. Частотные характеристики Д-закона регулирования: а - АЧХ; б - ФЧХ; в - АФХ

## Основные законы регулирования промышленных регуляторов

Пропорционально-дифференциальный закон регулирования представляет собой параллельное соединение пропорциональной и дифференциальной составляющих и описывается уравнением

$$u(t) = -\{C_1[y(t) - y^0] + C_2 y'(t)\} \quad (5.8)$$

Динамические характеристики ПД-регулятора (рис.5.5): -  
передаточная функция  $W(p) = -(C_1 + C_2 p)$  ;

- частотные характеристики:

$$W(i\omega) = -(C_1 + C_2 i\omega) \Rightarrow M(\omega) = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 \omega^2} ;$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{C_2 \omega}{C_1} \quad (5.9)$$

- кривая разгона  $u(t) = -[C_1 + C_2 \delta(t)]$



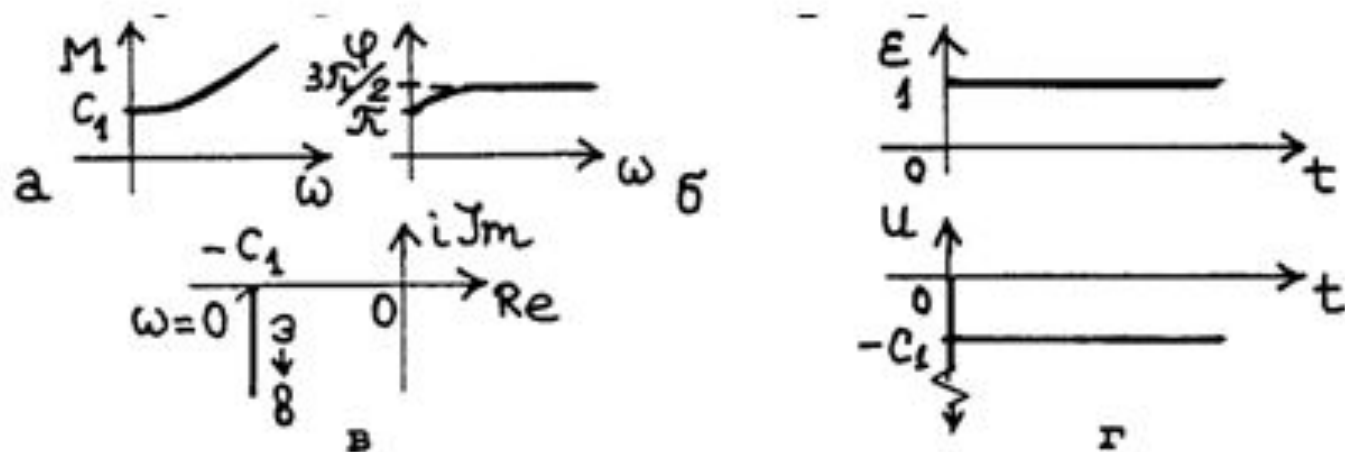


Рис.5.5. Динамические характеристики ПД-регулятора: а-АЧХ; б-ФЧХ; в-АФХ; г-кривая разгона

С точки зрения качества процессов регулирования в замкнутой АСР пропорционально-дифференциальный регулятор обладает особенностями обеих простейших составляющих: наличие воздействия по производной от  $y(t)$  увеличивает быстродействие регулятора, благодаря чему уменьшается динамическая ошибка регулирования по сравнению с АСР с П-регулятором (рис.5.6). В установившихся же режимах, регулятор ведет себя как обычный П-регулятор.

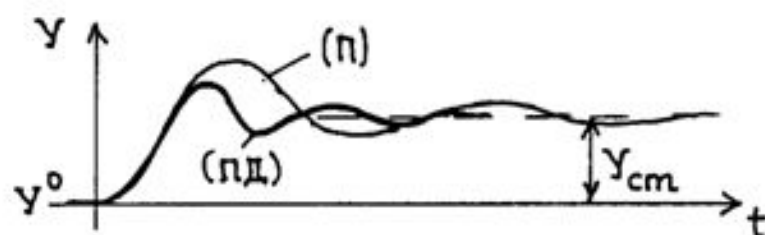


Рис.5.6. Процессы регулирования в АСР с П- и ПД регуляторами



**Пропорционально-интегральный закон регулирования** описывается уравнением

$$u(t) = -C_1[y(t) - y^0] + C_0 \int_0^t [y(\lambda) - y^0] d\lambda$$

Динамические характеристики ПИ-регулятора (рис.5.7):- передаточная функция  $W(p) = -[C_1 + C_0/p]$ ;

- частотные характеристики:

$$W(\omega) = -\left[C_1 + \frac{C_0}{i\omega}\right] = -\frac{C_1 i\omega + C_0}{i\omega} \Rightarrow M(\omega) = \frac{\sqrt{C_1^2 \omega^2 + C_0^2}}{\omega} \quad (5.11)$$

$$\varphi(\omega) = \pi - \frac{\pi}{2} = \operatorname{arctg} \frac{C_1 \omega}{C_0} = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{C_1 \omega}{C_0}$$

- кривая разгона  $u(t) = -[C_1 + C_0 t]$

- импульсная переходная функция

$$u(t) = -[C_1 \delta(t) + C_0]$$

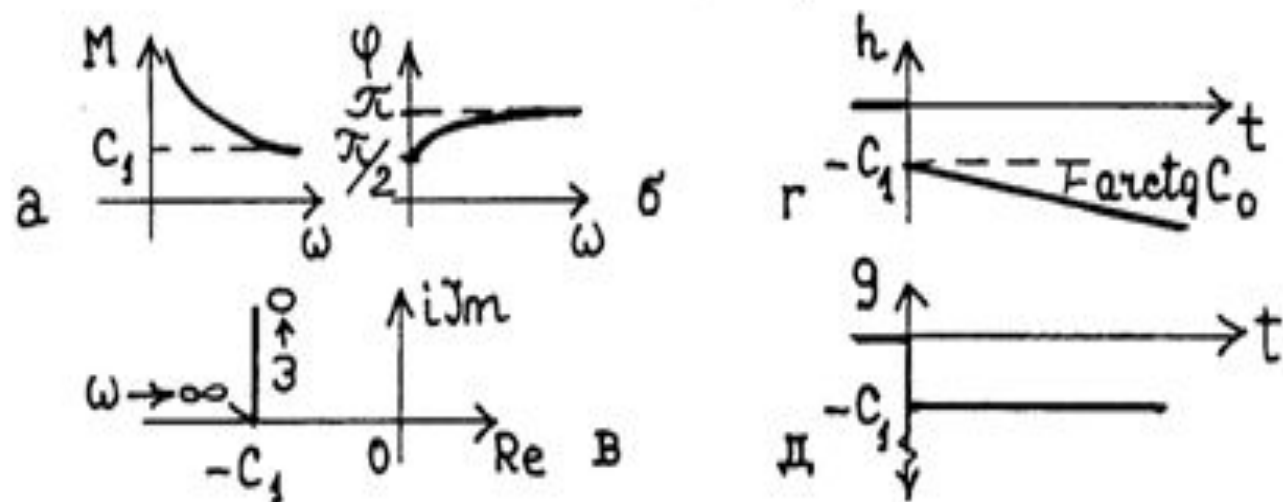


Рис.5.7. Динамические характеристики ПИ-регулятора: а-АЧХ; б-ФЧХ; в-АФХ; г-кривая разгона; д-ИПФ

Таким образом пропорционально-интегральный регулятор сочетает в себе достоинства П- и И-законов регулирования: пропорциональная составляющая обеспечивает достаточное быстродействие регулятора, а интегральная - ликвидирует статическую ошибку.

На рис.5.8 приведены процессы регулирования одного и того же объекта пропорциональным (кривая 1), интегральным (кривая 2) и пропорционально-интегральным (кривые 3,4) регуляторами.

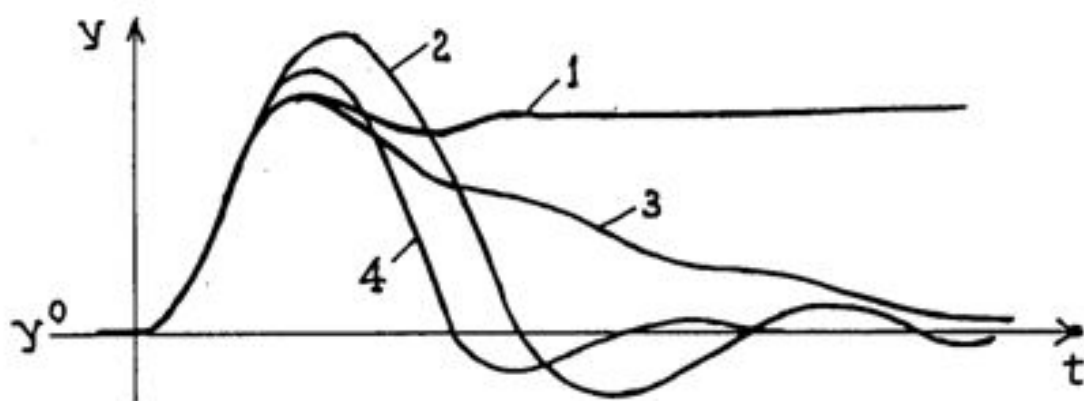


Рис.5.8. Процессы регулирования в АСР с П-, И- и ПИ-регуляторами

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования** описывается уравнением:

$$u(t) = - \left\{ C_1 [y(t) - y^0] + C_0 \int_0^t [y(\lambda) - y^0] d\lambda + C_2 y'(t) \right\} \quad (5.13)$$

Динамические характеристики ПИД-регулятора (рис.5.9): передаточная функция

$$W(p) = - \left( C_1 + \frac{C_0}{p} + C_2 p \right);$$

- частотные характеристики

$$W(i\omega) = - \left( C_1 + \frac{C_0}{i\omega} + C_2 i\omega \right) = - \frac{C_1 i\omega + C_0 - C_2 \omega^2}{i\omega} \Rightarrow$$

$$M(\omega) = \frac{\sqrt{C_1^2 \omega^2 + (C_0 - C_2 \omega^2)^2}}{\omega}; \quad (5.14)$$

$$\varphi(\omega) = \pi - \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{C_1 \omega}{C_0 - C_2 \omega^2} = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{C_1 \omega}{C_0 - C_2 \omega^2}$$

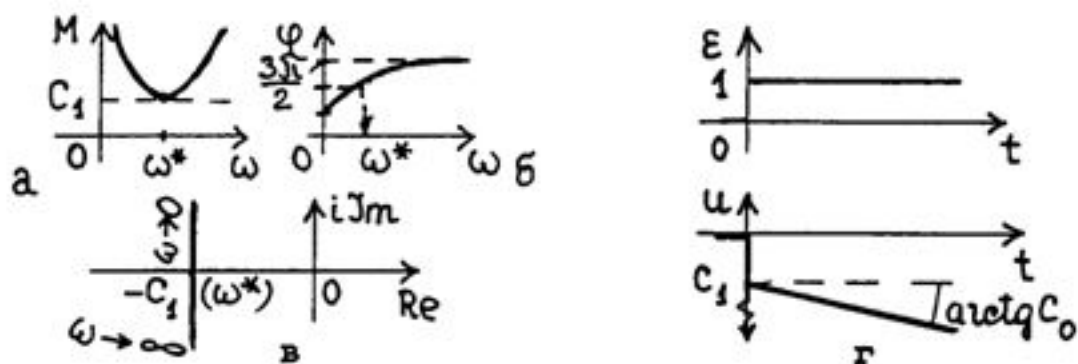


Рис.5.9. Динамические характеристики ПИД-регулятора: а-АЧХ; б-ФЧХ; в-АФХ; г-кривая разгона

ПИД-регулятор сочетает в себе достоинства всех простейших законов регулирования: высокое быстродействие и малую динамическую ошибку за счет воздействия по скорости изменения регулируемой переменной и отсутствие статической ошибки благодаря наличию интегральной составляющей.



На рис.5.10. приведены для сравнения процессы одного и того же объекта различными регуляторами при оптимальных настройках.

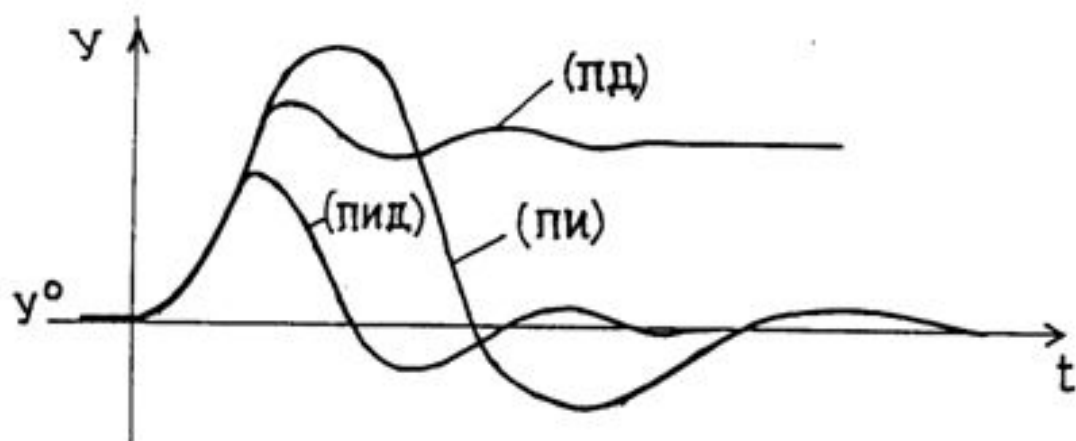


Рис. 5.10. Процессы регулирования в АСРс различными регуляторами

Необходимо отметить, что применение регуляторов с дифференциальными составляющими, несмотря на их достоинства, не всегда целесообразно, а иногда и недопустимо.

Так для объектов с большим чистым запаздыванием по каналу регулирования бесполезно вводить управляющее воздействие по производной от регулируемой переменной, так как оно будет сказываться на выходе объекта только по истечении времени запаздывания, за которое в объекте могут накопиться большие отклонения от заданного режима.

В некоторых случаях регулятор с дифференциальной составляющей может "раскачать" объект, и система потеряет устойчивость (например, при наличии высокочастотных возмущений на выходе объекта).

## **Расчет оптимальных настроек регуляторов**

Под оптимальными настройками регулятора понимают такие настройки, которые для данного объекта обеспечивают процесс регулирования удовлетворяющий выбранному критерию качества и ограничениям, например, минимуму интегрального квадратичного критерия и заданной степени колебательности.

В теории автоматического регулирования разработаны различные методы расчета настроек регуляторов, одни из которых являются более точными, но трудоемкими, другие - простыми, но более приближенными

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Общая задача управления* технологическим процессом формулируется обычно как задача максимизации (минимизации) некоторого критерия (себестоимости, энергозатрат, прибыли) при выполнении ограничений на технологические параметры, накладываемых регламентом. Решение такой задачи для всего процесса в целом очень трудоемко, а иногда практически невозможно ввиду большого числа факторов, влияющих на ход процесса. Поэтому весь процесс разбивают на отдельные участки, которые характеризуются сравнительно небольшим числом переменных. Обычно эти участки совпадают с законченными технологическими стадиями, для которых могут быть сформулированы свои подзадачи управления, подчиненные общей задаче управления

Задачи управления отдельными стадиями обычно направлены на оптимизацию (в частном случае, стабилизацию) технологического параметра или критерия, легко вычисляемого по измеренным режимным параметрам (производительность, концентрация продукта, степень превращения, расход энергии). Оптимизацию критерия проводят в рамках ограничений, задаваемых технологическим регламентом. На основании задачи оптимального управления отдельными стадиями процесса формулируют задачи автоматического регулирования технологических параметров для отдельных аппаратов.



Важным этапом в разработке системы автоматизации является *анализ основных аппаратов* как объектов регулирования, т. е. выявление всех существенных входных и выходных переменных и анализ статических и динамических характеристик каналов возмущения и регулирования.

Исходными данными при этом служат математическая модель процесса и (как первое приближение) статическая модель в виде уравнений материального и теплового балансов. На основе этих уравнений с учетом реальных условий работы аппарата все существенные факторы, влияющие на процесс, разбиваются на следующие группы.

**Возмущения, допускающие стабилизацию.** К ним относят независимые технологические параметры, которые могут испытывать существенные колебания, однако по условиям работы могут быть стабилизированы с помощью автоматической системы регулирования. К таким параметрам обычно относятся некоторые показатели входных потоков. Так, расход питания можно стабилизировать, если перед аппаратом имеется буферная емкость, сглаживающая колебания расхода на выходе из предыдущего аппарата; стабилизация температуры питания возможна, если перед аппаратом установлен теплообменник, и т. п.

Очевидно, при проектировании системы управления целесообразно предусмотреть автоматическую стабилизацию таких возмущений. Это позволит повысить качество управления процессом в целом. В простейших случаях на основе таких систем автоматической стабилизации возмущений строят разомкнутую (относительно основного показателя процесса) систему автоматизации, обеспечивающую устойчивое ведение процесса в рамках технологического регламента.

**Контролируемые возмущения.** К ним условно относят те возмущения, которые можно измерить, но невозможно или недопустимо стабилизировать (расход питания, подаваемого непосредственно из предыдущего аппарата; температура окружающей среды и т. п.).

Наличие существенных нестабилизируемых возмущений требует применения либо замкнутых по основному показателю процесса систем регулирования, либо комбинированных АСР, в которых качество регулирования повышается введением динамической компенсации возмущения.

**Неконтролируемые возмущения.** К ним относятся те возмущения, которые невозможно или нецелесообразно измерять непосредственно. Первые — это падение активности катализатора, изменение коэффициентов тепло- и массопередачи и т. п. Примером вторых может служить давление греющего пара в заводской сети, которое колеблется случайным образом и является источником возмущения в тепловых процессах. Выявление возможных неконтролируемых возмущений — важный этап в исследовании процесса и разработке системы управления. Наличие таких возмущений требует, как и в предыдущем случае, обязательного применения замкнутых по основному показателю процесса систем автоматизации.

**Возможные регулирующие воздействия.** Это материальные или тепловые потоки, которые можно изменять автоматически для поддержания регулируемых параметров

**Выходные переменные.** Из их числа выбирают регулируемые координаты. При построении замкнутых систем регулирования в качестве регулируемых координат выбирают технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального или теплового баланса в аппарате. К ним относятся: *уровень жидкости* — показатель баланса по жидкой фазе; *давление* — показатель баланса по газовой фазе; *температура* — показатель теплового баланса в аппарате; *концентрация* — показатель материального баланса по компоненту.

На основе анализа технологического процесса как объекта регулирования проектируют систему автоматизации, обеспечивающую решение поставленной задачи регулирования. Начинают с *проектирования одноконтурных АСР отдельных параметров*: они наиболее просты в наладке и надежны в работе, поэтому широко используются при автоматизации технологических объектов.



# РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

К основным технологическим параметрам, подлежащим контролю и регулированию в химико-технологических процессах, относят расход, уровень, давление, температуру, значение рН и показатели качества (концентрацию, плотность, вязкость и др.).

**Регулирование расхода.** Необходимость регулирования расхода возникает при автоматизации практически любого непрерывного процесса. АСР расхода, предназначенные для стабилизации возмущений по материальным потокам, являются неотъемлемой частью разомкнутых систем автоматизации технологических процессов. Часто АСР расхода используют как внутренние контуры в каскадных системах регулирования других параметров. Для обеспечения заданного состава смеси или для поддержания материального и теплового балансов в аппарате применяют системы регулирования соотношения расходов нескольких

Рис. 2.1. Принципиальная схема объекта при регулировании расхода:

1 — измеритель расхода, 2 — регулирующий клапан

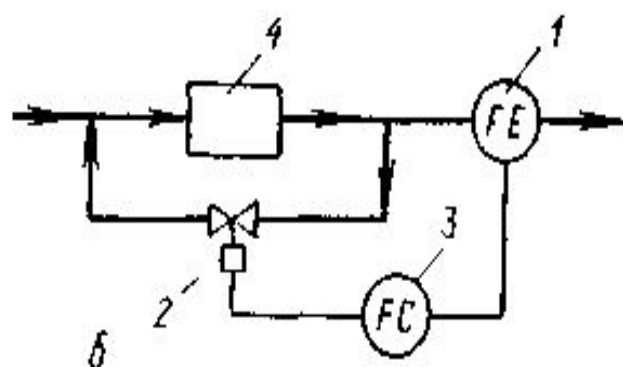
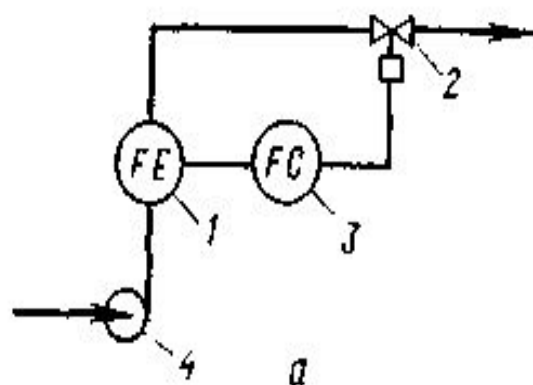
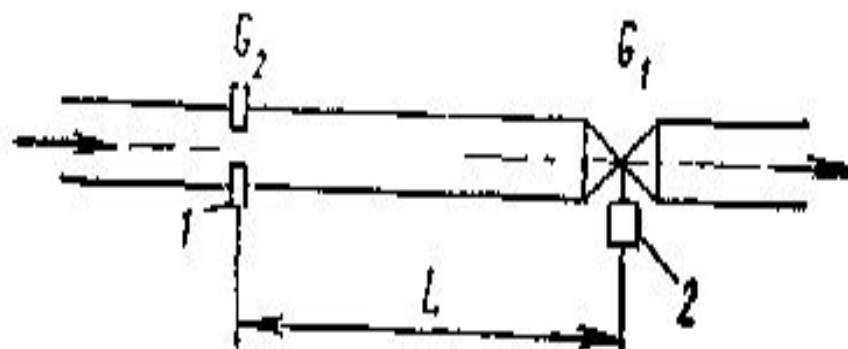


Рис. 2.3. Схемы регулирования расхода после центробежного (а) и поршневого (б) насосов:

1 — измеритель расхода; 2 — регулирующий клапан, 3 — регулятор; 4 — насос

В системах регулирования расхода применяют один из трех способов изменения расхода:

дросселирование потока вещества через регулирующий орган, устанавливаемый на трубопроводе (клапан, шибер, заслонка);

изменение напора в трубопроводе с помощью регулируемого источника энергии (например, изменением числа оборотов двигателя насоса или угла поворота лопастей вентилятора);

байпасирование, т. е. переброс избытка вещества из основного трубопровода в обводную линию.

Регулирование расхода после центробежного насоса осуществляется регулирующим клапаном, устанавливаемым на нагнетательном трубопроводе (рис. 2.3,а). Если для перекачивания жидкости используют поршневой насос, применение подобной АСР недопустимо, так как при работе регулятора клапан может закрыться полностью, что приведет к разрыву трубопровода (или к помпажу, если клапан установлен на входе насоса). В этом случае для регулирования расхода используют байпасирование потока (рис. 2.3,б).

## РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ

Постоянство уровня жидкости в аппарате означает соблюдение материального баланса, т.е. приток жидкости равен стоку, а скорость изменения количества жидкости в аппарате равна нулю. Если в аппарате (резервуаре, сборнике, промежуточной емкости) не происходит фазового превращения, то приток равен расходу жидкости, поступающей в аппарат, а ее сток — расходу жидкости, покидающей аппарат. При отсутствии фазовых превращений в аппарате уровень в нем можно регулировать:

- на притоке, изменяя расход жидкости на входе в аппарат;
- на стоке, изменяя расход жидкости на выходе из аппарата;
- соотношением расходов жидкости на входе в аппарат и выходе из него с коррекцией по уровню (каскадная САР).

В тех случаях, когда не требуется высокое качество регулирования, а возмущающие воздействия не имеют постоянной составляющей, приводящей к статической погрешности, применяют П-регуляторы. Для регулирования уровня без статической погрешности применяют ПИ-регуляторы.

## **5.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРО-ЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

Паро-жидкостной теплообменник относится к теплообменникам, в которых хотя бы один из теплоносителей меняет свое агрегатное состояние.

В теплообменниках, предназначенных для нагревания жидкости до заданной температуры за счет теплоты конденсации греющего пара, основной задачей регулирования является стабилизация температуры жидкости на выходе из теплообменника.

**Примечание.** В испарителях или конденсаторах (предназначенных для испарения или конденсации жидкости) задача регулирования сводится к поддержанию материального баланса по технологическому потоку.