

Средства логического управления

Изучение характеристик и моделей
автоматических систем регулирования

Основные сведения о системах автоматического регулирования

Для управления современным производственным процессом необходимо наблюдать, измерять, анализировать данные о ходе производственного процесса. Эта информация передается на соответствующие пункты управления. Поступившая в эти пункты информация перерабатывается и используется для принятия решений о том, как следует воздействовать на технологический процесс. Таким образом, всякая операция управления и регулирования требует получения, передачи, преобразования и использования информации для того, чтобы провести определенные целенаправленные действия. Причем при автоматизированном производстве все это осуществляется автоматическими устройствами.

При автоматизации производственных процессов в зависимости от характера и объема операций, выполняемых автоматическими устройствами, различают следующие виды автоматизации.

1. Автоматический контроль.
2. Автоматическая защита.
3. Автоматическое управление.
4. Автоматическое регулирование.

Автоматический контроль разнообразных величин (температуры, давления, расхода, влажности, уровня и т.д.) тесно связан с измерением этих величин. При измерении дается количественная оценка параметру, т.е. определяется численное значение той или иной величины в выбранных единицах. Для контроля применяются измерительные приборы, рассмотренные в первой части учебника.

В соответствии с содержанием исполнительного элемента автоматический контроль делится на следующие 4 основных вида:

- а) автоматическая сигнализация характерных или предельных значений параметров (сигнализирующий прибор световой, звуковой);
- б) автоматическое указание значений контролируемых параметров (указывающий прибор-шкала и стрелка, цифровой прибор);
- в) автоматическая регистрация значений контролируемых параметров (регистрирующий прибор-запись на бумаге, магнитной ленте);
- г) автоматическая сортировка различных изделий в зависимости от заданных значений контролируемых параметров (сортирующий прибор по весу, размеру и др.).

- Автоматическим регулированием называется процесс автоматического поддержания заданных значений какой-либо физической величины в заранее установленных условиях.

Автоматическое регулирование является наиболее сложным видом автоматизации, оно состоит из автоматического контроля и автоматического управления.

Сигнал от регулируемого параметра y (рис.1) поступает на воспринимающий элемент-датчик Д. От датчика сигнал поступает на элемент сравнения ЭС; на этот же элемент поступает сигнал от задающего элемента-задатчика ЗД. В элементе сравнения сопоставляется требуемое значение параметра, поступающее от задающего элемента, с действительным его значением, поступающим от воспринимающего элемента-датчика. В результате такого сопоставления (сравнения) вырабатывается управляющее воздействие. Обычно это воздействие, слабое по величине, поступает в электронный усилитель ЭУ (не всегда), где оно усиливается по величине и мощности за счет постороннего источника питания ИП, и направляется на исполнительный элемент ИЭ. Исполнительный элемент воздействует на регулирующий орган ОР, который оказывает влияние на регулируемый параметр. Этим замыкается основная цепь воздействий автоматической системы регулирования.

Большинство систем автоматического регулирования, применяющихся в настоящее время в промышленности, являются системами автоматической стабилизации. В такой системе автоматическое устройство поддерживает постоянным заранее заданное значение физической величины, например, автоматическое поддержание неизменного давления, расхода газа или жидкости, температуры в печи и т.д. Имеются технологические процессы, в которых заданное значение регулируемой величины не должно быть постоянным, а должно изменяться во времени по некоторому заранее известному закону. Система автоматического регулирования такого вида называется программным регулированием.

В следящих системах регулирования регулируются величины, для которых закон изменения заранее неизвестен и определяется внешними процессами. В последние годы начали применяться также оптимальные (экстремальные) системы. Такие системы не только поддерживают заданное значение регулируемой величины, но одновременно определяют каким должно быть заданное значение, чтобы регулируемый процесс протекал наилучшим (оптимальным) образом.

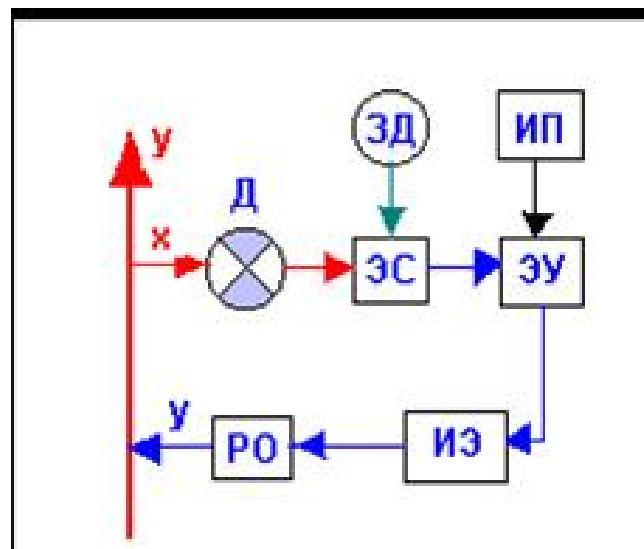
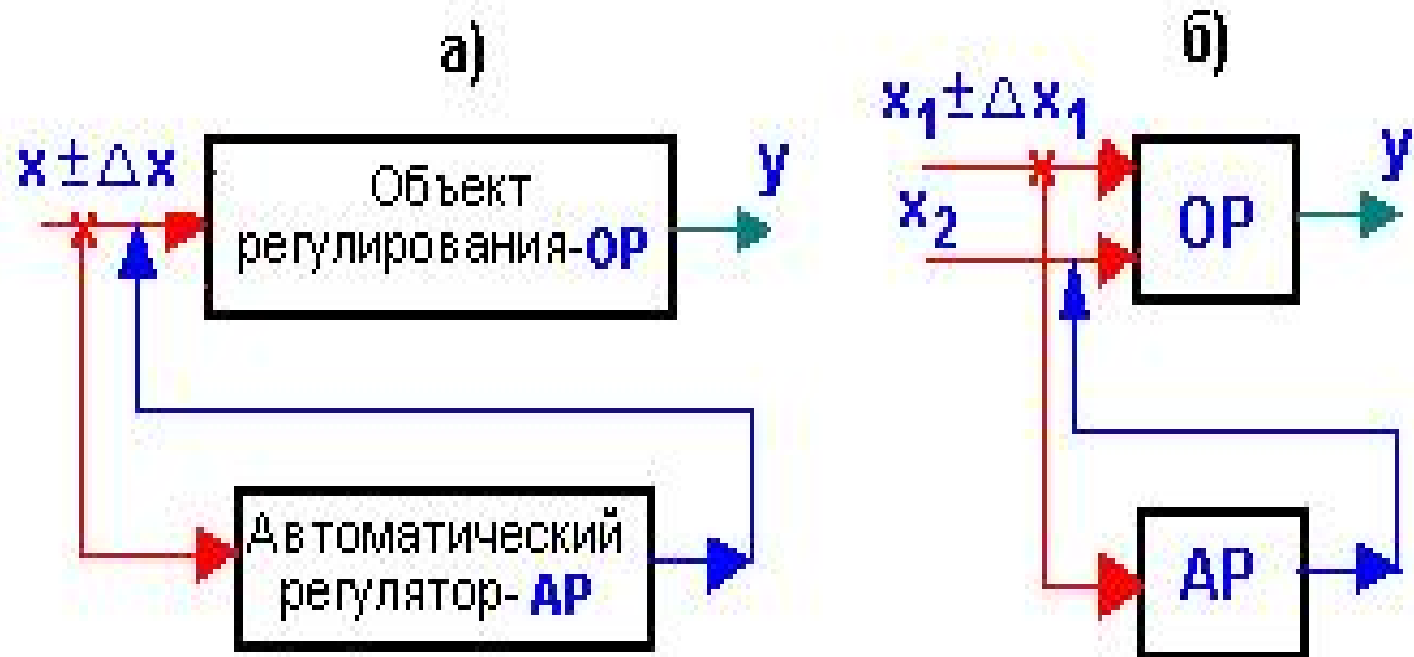


Рис.1 – Структурная схема
автоматического регулирования

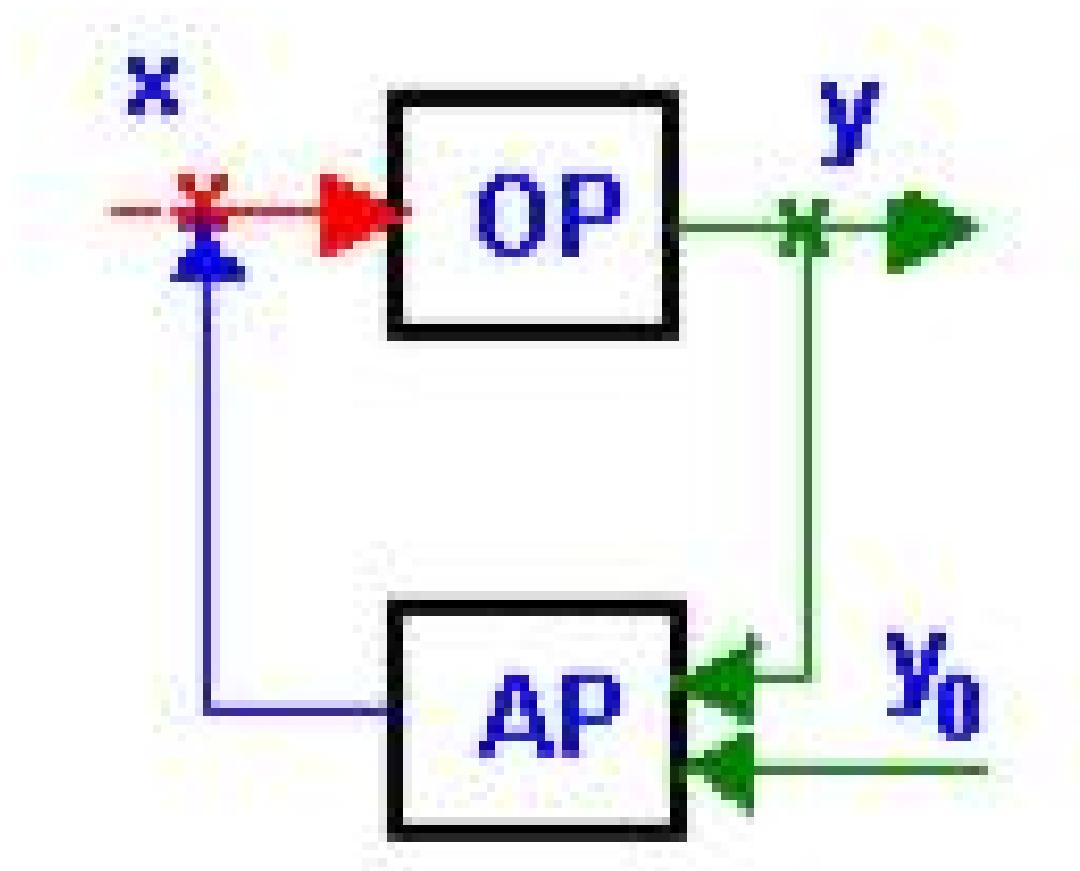
Классификация систем автоматического регулирования

В практике автоматического регулирования используются различные структурные и функциональные разновидности САР: разомкнутые, замкнутые, комбинированные, самонастраивающиеся и др.

- Разомкнутые САР - это системы автоматического регулирования по возмущению. В них регулирующее воздействие вводится на входе объекта при заранее выбранных условиях без контроля выходных величин объекта. Структурная схема разомкнутой САР приведена на рис.3. В такой САР в регулятор вводится информация о значении одной из входных величин, например, той, которая наиболее подвержена сильным возмущениям. При наличии разницы между фактическим и номинальным значением этой величины осуществляется регулирующее воздействие либо на нее (рис.3,а), либо на другую входную величину (рис.3,б), технологически с ней связанную. Последний случай довольно часто встречается в практике автоматического регулирования. Например, широко известны автоматизированные смесеприготовительные установки непрерывного действия, в которых автомат изменяет подачу воды в смеситель на основании информации о температуре и влажности оборотной смеси.



- Рис.3 – Структурная схема разомкнутой САР



- Рис.4 – Схема замкнутой САР

- Самое широкое распространение в автоматике получили системы автоматического регулирования по отклонению, являющиеся замкнутыми САР (рис.4). В таких системах регулирующее воздействие вводится по определенному закону, связанному с отклонением выходных величин от их заданных значений. В таких системах выходная величина объекта регулирования y непрерывно сравнивается с заданным ее значением y_0 ; регулятор вычисляет величину рассогласования $\Delta y = y - y_0$ и воздействует на вход объекта до тех пор, пока не исчезнет рассогласование.

- Связь объекта с регулятором по каналу передачи информации с выхода объекта на вход регулятора, а затем выхода регулятора на вход объекта обеспечивается наличием отрицательной обратной связи в системе. По своему влиянию на выходную величину объекта регулирующее воздействие противоположно воздействию возмущающему, что типично для устройств с отрицательной обратной связью, в которых выходной сигнал устройства подается обратно на его вход в противофазе с причиной, обусловившей появление выходного сигнала. Как и в любых системах с обратной связью, в рассматриваемой системе возникает характерная цепь причинно-следственных отношений: с одной стороны, появление рассогласования Δu является следствием изменений на входе объекта регулирования, с другой - изменения на входе обусловлены регулирующим воздействием, причиной которого является наличие рассогласования.

- В отличие от разомкнутых систем замкнутые САР одинаково функционируют вне зависимости от того, какая их входных величин подверглась возмущению. Эта инвариантность к источнику возмущения вызвана тем, что регулятор реагирует на рассогласование в объекте, а не его причину, что является наиболее ценным свойством замкнутых САР. Тем не менее данным системам присущи и серьезные недостатки. Основной из них заключается в том, что в отличие от разомкнутых САР замкнутые системы не способны обеспечить абсолютно точного поддержания постоянного значения выходной величины объекта, так как само появление регулирующего воздействия возможно лишь при наличии рассогласования. Таким образом, в самом принципе регулирования заложена возможность отклонения y от y_0 .

- Это приводит к тому, что при регулировании процессов в сложных инерционных объектах, когда регулирующее воздействие не может мгновенно вызвать соответствующего изменения выходной величины, возникающее рассогласование может стать недопустимо большим. Кроме того, как и во многих инерционных системах, охваченных обратной связью, здесь могут возникать продолжительные, а иногда незатухающие колебания выходной величины объекта. В связи с этими особенностями замкнутых САР их расчет, подбор и настройка регулятора сопряжены с известными трудностями, так как требуют тщательного учета особенностей элементов системы. Если основной задачей САР является поддержание неизменного значения выходной величины объекта, то она называется САР стабилизации.

- Существуют и другие разновидности САР, в которых обеспечивается не стабилизация, а изменение выходной величины либо в зависимости от некоторой другой величины - следящие САР, либо в функции времени - программные САР. В этих системах в регулятор вводится информация о действительном и заданном характере изменения выходной величины объекта. При этом регулятор поддерживает постоянство, например, скорости изменения выходной величины. Необходимость в этом возникает, в частности, при автоматизации сушки стержней или термообработке отливок, когда нагрев или охлаждение необходимо вести с определенной скоростью в течение заданного времени. Следует отметить, что в качестве программных регуляторов могут использоваться и обычные регуляторы стабилизации в случае, если между входом регулятора и выходом объекта включается дополнительное дифференцирующее устройство, формирующее сигнал, пропорциональный производной выходной величины по времени.

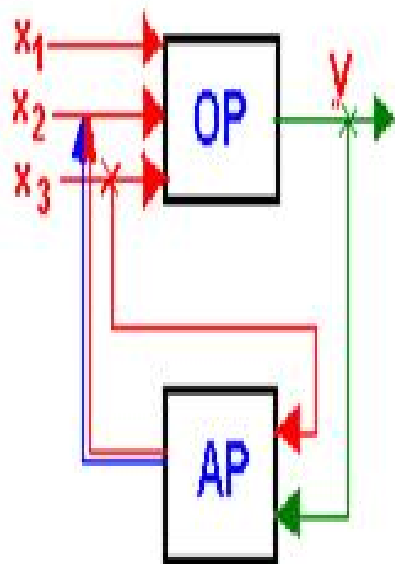


Рис.5 –
Комбинированная
CAP



Рис.6 – Замкнутая
самонастраивающаяся
CAP

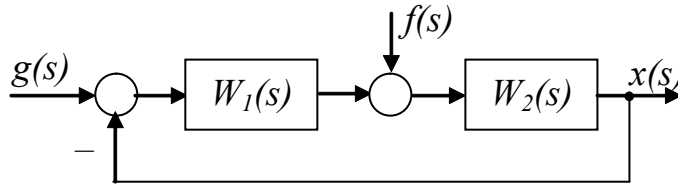
- Достоинства замкнутых и разомкнутых САР сочетаются в комбинированных системах, структурная схема которых представлена на рис.5. В таких САР влияние наиболее существенного и вероятного возмущения компенсируется по принципу разомкнутого регулирования, а воздействие других факторов устраняется за счет влияния в системе замыкающей ветви. Во всех рассмотренных САР рассматривались регуляторы, каждый из которых функционирует по некоторому заданному закону регулирования, сохраняющемуся в любых условиях до тех пор, пока регулятор не перенастроят вручную. Однако, в ходе многих технологических процессов требуется быстро изменить характер регулирующего воздействия при изменении, например, параметров объекта регулирования. В этих условиях автоматический учет новой дополнительной информации о свойствах объекта, выбор нового оптимального задания его выходной величины могут реализовать так называемые замкнутые самонастраивающиеся САР.

- Структурная схема подобной системы приведена на рис.6. В этой САР наряду с отрицательной обратной связью по выходной величине предусмотрено изменение параметров настройки и работы регулятора путем автоматического поиска этих параметров в зависимости от свойств объекта и хода процесса регулирования. Самовыравнивающиеся САР предназначены для работы в непрерывно изменяющихся условиях производства: при изменении качества материалов, величины потерь, переменных динамических свойствах объектов и др.

Такие САР приспособляются к этим изменениям, автоматически меняя свои параметры (входные величины, задания, настройки и даже структуру), чтобы во всех случаях удовлетворять определенным требованиям, например, обеспечивать не постоянное, а оптимальное в данной ситуации значение выходной величины объекта регулирования. Рассмотренные схемы показывают, что САР весьма разнообразны по структуре и свойствам. Выбор и синтез САР сводится к некоторому оптимальному сочетанию ее элементов на основе тщательного учета особенностей регулятора и объекта автоматического регулирования.

ХАРАКТЕРИСТИКИ САР

Передаточные функции САР по управляющему и возмущающему воздействию



$g(s)$ – задающее воздействие;
 $f(s)$ – возмущающее воздействие;
 $x(s)$ – регулируемая координата.

согласно принципа суперпозиции

$$x(s) = K_g(s)g(s) + K_f(s)f(s)$$

$K_g(s)$ – ПФ замкнутой САР по управляющему воздействию (по управлению)

$K_f(s)$ – ПФ замкнутой САР по возмущающему воздействию (по возмущению)

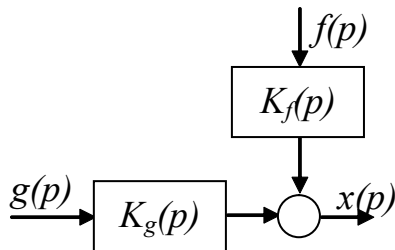
При определении ПФ замкнутой САР по одному из воздействий другое воздействие принимается равным нулю.

Полагая $f(p) = 0$, ПФ по управлению:

$$K_g(p) = \frac{x(p)}{g(p)} = \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2}$$

Полагая $g(p) = 0$, ПФ по возмущению:

$$K_f(p) = \frac{x(p)}{f(p)} = \frac{W_2}{1 + W_1 W_2}$$



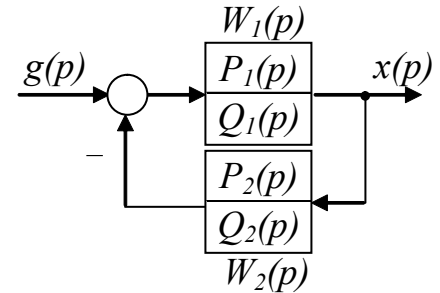
Эквивалентная схема
линейной САР

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Параметры передаточных функций разомкнутых и замкнутых САР

ПФ разомкнутой САР: $W_0(p) = W_1(p)W_2(p) = \frac{P_1(p)P_2(p)}{Q_1(p)Q_2(p)} = \frac{P(p)}{Q(p)}$

ПФ замкнутой САР:
$$K(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_0(p)} = \frac{\frac{P_1(p)}{Q_1(p)}}{1 + \frac{P_1(p)P_2(p)}{Q_1(p)Q_2(p)}} = \frac{Q_2(p)P_1(p)}{Q_1(p)Q_2(p) + P_1(p)P_2(p)} = \frac{Q_2(p)P_1(p)}{Q(p) + P(p)} = \frac{H(p)}{G(p)}$$



Из последнего равенства следует то важное соотношение, что характеристический полином замкнутой САР равен сумме числителя и знаменателя ПФ разомкнутой САР:

$$G(p) = P(p) + Q(p)$$

ПФ замкнутой САР может быть представлена как отношение двух операторов-многочленов:

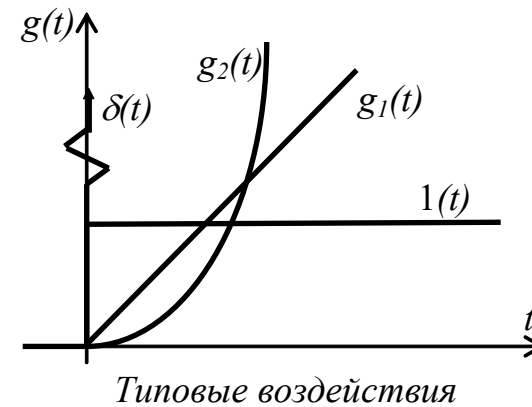
$$K(p) = \frac{H(p)}{G(p)} = \frac{b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_mp^m}{a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_np^n}$$

Отметим такое важное свойство полиномов: если все коэффициенты полинома – действительные числа, то в общем случае нулями его могут быть как действительные, так и комплексные числа, причем комплексные нули такого полинома (при их наличии) образуют комплексно-сопряженные пары.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Типовые воздействия

При анализе характеристик САР применяются следующие типовые воздействия:



1. Единичный скачок (единичная ступенчатая функция Хевисайда):

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

Такое воздействие имеет место в штатных режимах работы. Этому типу воздействия соответствуют, например, режимы включения и отключения питания электродвигателей, режима наброса и сброса нагрузки.

2. Дельта-функция:

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt} = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0 \\ 0, & \text{при } t \neq 0 \end{cases}$$

Этому типу нагрузки соответствуют случаи внезапного увеличения нагрузки электродвигателей, например, при резке или распиловке материала, вызванные технологическим циклом (начало реза) или неоднородностью материала.

Физически эта функция описывает импульс бесконечно большой амплитуды и бесконечно малой продолжительности, ограничивающий площадь, равную единице.

3. Полиномиальные воздействия вида

$$g(t) = \begin{cases} c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_k t^k, & \text{при } t \geq 0; \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Частными случаями такого воздействия, например, являются

Эти воздействия соответствуют случаям изменения управления с постоянной скоростью и с постоянным ускорением соответственно.

$$g_1(t) = \begin{cases} c_1 t, & \text{при } t \geq 0; \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

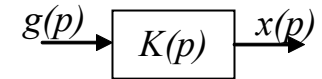
или

$$g_2(t) = \begin{cases} c_2 t^2, & \text{при } t \geq 0; \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Временные характеристики замкнутых САР, их взаимосвязь и связь с передаточной функцией

Любая, сколь угодно сложная САР может быть представлена в виде, представленном на рис., и описана уравнениями в области изображений Лапласа:



$$x(p) = K(p)g(p) \quad (*)$$

Помимо ДУ и ПФ, в ТАУ при описании и анализе САР широко используют переходные функции и временные характеристики.

*Переходной функцией САР (или звена) называют функцию $h(t)$, описывающую реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие $1(t)$ при нулевых начальных условиях. График этой функции называют **переходной характеристикой**.*

*Импульсной переходной или весовой функцией (функцией веса) называют функцию $w(t)$, описывающую реакцию САР (или звена) на единичное импульсное воздействие $\delta(t)$ при нулевых начальных условиях. График этой функции называют **импульсной переходной характеристикой (весовой характеристикой)**.*

Переходную и импульсную переходную функции называют *временными функциями*, а их графики – *временными характеристиками*.

Между ПФ в изображениях Лапласа, переходной функцией и весовой функцией существует взаимнооднозначное соответствие.

Из определения импульсной переходной функции следует, что при подстановке в (*) управляющего воздействия $g(t) = \delta(t)$ *изменение выходной координаты будет соответствовать импульсной переходной (весовой) характеристике, т.е. $x(t) = w(t)$* . В изображениях Лапласа:

$$x(p) = L[w(t)] = w(p) \quad \text{при} \quad g(p) = L[\delta(t)] = 1 \quad \text{Подставив эти выражения в } (*), \text{ получим, что } w(p) = K(p)$$

то есть, *изображения Лапласа импульсной переходной функции и передаточной функции САР равны*.

Это означает, что, если известна ПФ замкнутой САР $K(p)$, то импульсная переходная функция $w(t)$ может быть определена с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$w(t) = L^{-1}[K(p)]$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Временные характеристики замкнутых САР, их взаимосвязь и связь с передаточной функцией

Импульсная переходная функция является исчерпывающей динамической характеристикой САР в том смысле, что, зная ее, всегда можно определить реакцию САР на любое воздействие.

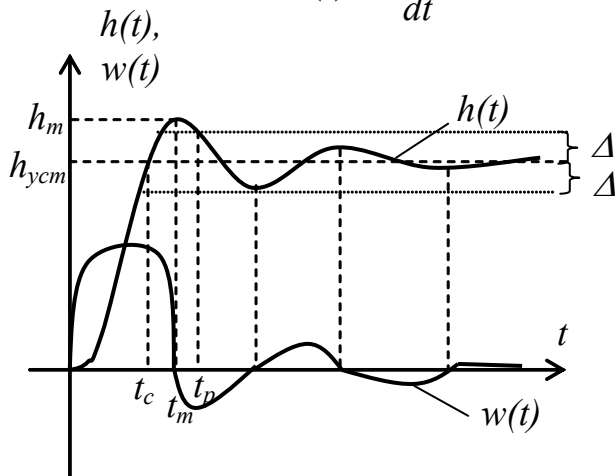
Из определения переходной функции следует, что при подстановке воздействия $g(t)=1(t)$ в (*) будет

$$x(t)=h(t), \text{ или в изображениях Лапласа: } x(p)=L[h(t)]=h(p) \quad \text{при} \quad g(p)=L[1(t)]=\frac{1}{p}$$

Подставив эти выражения в (*), получим, что $K(p)=ph(p)$

Если для этого выражения применить обратное преобразование Лапласа, то в левой части, согласно $w(t)=L^{-1}[K(p)]$, будем иметь импульсную переходную функцию, а в правой части – производную от переходной функции по времени:

$$w(t)=\frac{dh(t)}{dt}$$



Временные функции замкнутых САР

При этом переходная функция $h(t)$ замкнутой системы имеет следующие показатели:

h_{ycm} – установившееся значение переходной функции (регулируемой координаты);

h_m – максимальное значение;

Δ – величина, определяющая окрестность точки h_{ycm} , внутри которой процесс можно считать установившимся (обычно в технических системах $\Delta=0,05h_{ycm}$)

t_c – время первого согласования переходной функции с установившимся значением;

t_m – время достижения переходной функцией значения h_m ;

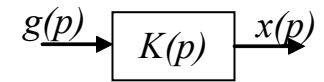
t_p – время регулирования, по истечении которого переходный процесс войдет в зону $h_{ycm} \pm \Delta$ и больше из нее не выйдет.

Временные показатели t_c , t_m , t_p характеризуют *быстродействие САР*.

Колебательность САР характеризуется показателем *перерегулирования*, который обычно измеряется в процентах:

$$\sigma = \frac{h_m - h_{ycm}}{h_{ycm}} \times 100\%$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР



Понятие установившегося и свободного процессов. Частотная функция

Реакция САР на произвольное воздействие $g(t)$ может быть определена по выражению: $x(t) = \int_0^t k(\tau)g(t-\tau)d\tau$ (**)

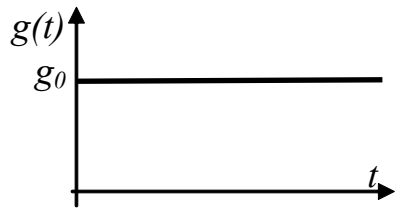
где t – время наблюдения за реакцией САР.

При переходном процессе в нормально функционирующей системе все величины (координаты САР) состоят из установившихся (вынужденных) и свободных составляющих.

Таким образом для рассматриваемой САР, если устремить $t \rightarrow \infty$, выражение (**) будет описывать *вынужденный процесс*, который имеет место после затухания всех свободных составляющих

$$x(t) = \int_0^t k(\tau)g(t-\tau)d\tau = \int_0^{\infty} k(\tau)g(t-\tau)d\tau - \int_t^{\infty} k(\tau)g(t-\tau)d\tau = x_{\text{блн}}(t) + x_{\text{св}}(t)$$

Пример 1. Определить вынужденный процесс в САР при скачкообразном воздействии $g(t) = g_0$



Вынужденный процесс:

$$x_{\text{блн}}(t) = \int_0^{\infty} k(\tau)g(t-\tau)d\tau = g_0 \int_0^{\infty} k(\tau)d\tau$$

Поскольку $g(t-\tau) = g_0$. Второй множитель есть не что иное, как ПФ САР

$$K(p) = \int_0^{\infty} k(\tau)e^{-p\tau}d\tau \quad \text{при } p \rightarrow 0, \text{ т.е. } K(0)$$

Из этого выражения видно, что вынужденный процесс от скачкообразного воздействия не зависит от времени и пропорциональный площади, ограниченной импульсной характеристикой САР:

$$x_{\text{блн}}(t) = K(0)g_0$$

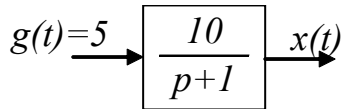
Таким образом, вынужденный процесс от постоянного (скачкообразного) воздействия равен произведению величины этого воздействия на ПФ $K(p)$ при $p=0$.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Понятие установившегося и свободного процессов. Частотная функция

Пример 1 Этот же результат можно получить, если учесть, что в рассматриваемом примере $g(p) = g_0/p$, и воспользоваться теоремой о конечном значении, согласно которой

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_{\text{блн}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} p x(p) = \lim_{s \rightarrow 0} p g(p) K(p) = \lim_{s \rightarrow 0} p \frac{g_0}{p} K(p) = K(0) g_0$$



Например, для САР вынужденный процесс будет: $x_{\text{блн}}(t) = 5 \cdot 10 = 50$

Пример 2. Определить вынужденный процесс при гармоническом воздействии $\bar{g}(t) = g_0 e^{j\omega t}$

Вычислим

$$\bar{g}(t - \tau) = g_0 e^{j\omega(t - \tau)} = g_0 e^{j\omega t} e^{-j\omega \tau} = \bar{g}(t) e^{-j\omega \tau}$$

Вынужденный процесс:
$$x_{\text{блн}}(t) = \int_0^{\infty} k(\tau) g(t - \tau) d\tau = \bar{g}(t) \int_0^{\infty} k(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau$$

Второй множитель есть ПФ САР $K(p) = \int_0^{\infty} k(\tau) e^{-p\tau} d\tau$ при $p = j\omega$

Тогда

$$x_{\text{блн}}(t) = K(j\omega) \bar{g}(t)$$

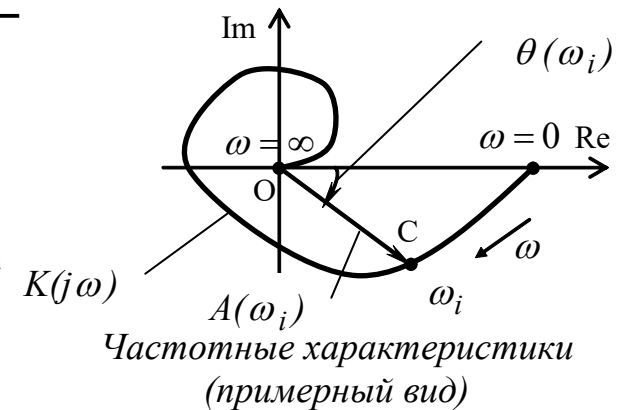
Зависимость $K(j\omega) = K(p)|_{p=j\omega}$ называется *частотной передаточной функцией САР*.

Таким образом, вынужденный процесс от гармонического воздействия является также гармоническим, и равен произведению частотной функции на входное воздействие.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Частотные характеристики и их физический смысл

Частотную функцию САР изображают графически на комплексной плоскости при изменении частоты ω гармонического сигнала от нуля (или от $-\infty$) до $+\infty$. Такой график изменения положения годографа частотной функции при изменении частоты называется *частотной характеристикой*.



Частотную характеристику можно представить в следующем виде:

$$K(j\omega) = A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$$

$A(\omega) = |K(j\omega)|$ – *амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* САР, равная длине годографа частотной характеристики);

$\theta(\omega) = \arg[K(j\omega)]$ – *фаза-частотная характеристика (ФЧХ)* САР, равная угловому положению годографа частотной характеристики.

Таким образом, АЧХ есть коэффициент передачи между амплитудой входного гармонического сигнала и амплитудой выходного сигнала. Другими словами, значение АЧХ при определенной частоте входного гармонического сигнала равно отношению амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала.

ФЧХ характеризует сдвиг по фазе выходного гармонического сигнала относительно входного. Если $\theta < 0$, то выходной сигнал отстает по фазе от входного сигнала, в противном случае – опережает. Таким образом, если САР работоспособна, то при входном воздействии $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ после окончания переходного процесса выходной сигнал будет иметь вид:

$$x = U_m A(\omega) \sin[\omega t + \varphi + \theta(\omega)]$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Частотные характеристики и их физический смысл

Пример. Построить частотную характеристику САР с ПФ

$$K(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

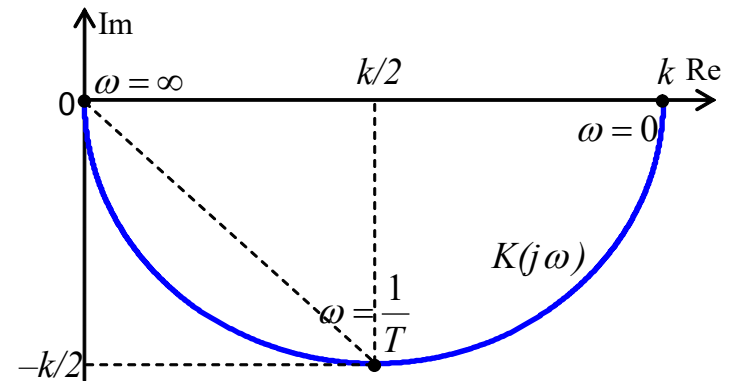
Решение. Записываем выражения для частотных характеристик:

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

$$A(\omega) = |K(j\omega)| = \frac{|\text{числителя}|}{|\text{знаменателя}|} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

$$\theta(\omega) = \arg[K(j\omega)] = \arctg \frac{-k\omega T}{k} = -\arctg \omega T$$

ω	$K(j\omega)$	$A(\omega)$	$\theta(\omega)$
0	k	k	0
$1/T$	$\frac{k}{2} - j\frac{k}{2}$	$0,707k$	$\pi/4$
∞	0	0	$\pi/2$



Очевидно, что с ростом частоты $A(\omega)$ снижается, а $\theta(\omega)$ возрастает. В действительности частотная характеристика $K(j\omega)$ будет иметь форму полукруга.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Частотные характеристики и их физический смысл

Графическое же изображение АЧХ и ФЧХ будет очень неудобным для восприятия, поэтому используют так называемые *логарифмические частотные характеристики*.

Логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) называется зав-мость $L(\omega) = 20 \lg |K(j\omega)|$

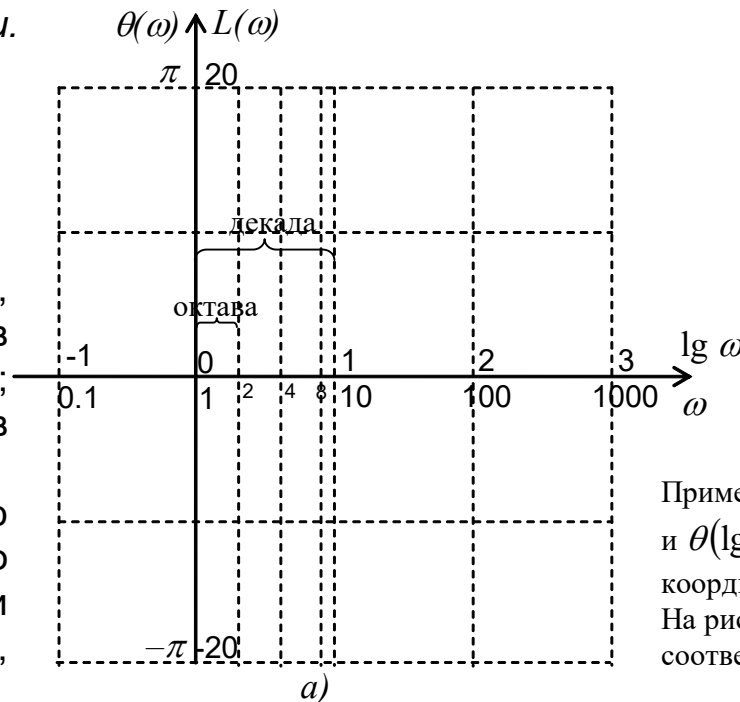
которая строится в осях $\lg \omega$, L и измеряется в децибелах (дБ).

Бел – логарифмическая единица двух одноименных физических величин, соответствующая десятикратному увеличению мощности.

Логарифмической фазо-частотной характеристикой (ЛФЧХ) является зависимость $\theta(\omega)$ которая строится в осях $\lg \omega$, θ (рис.а).

Отрезок на оси абсцисс, соответствующий увеличению частоты в 2 раза, называется *октавой*; соответствующий увеличению частоты в 10 раз – *декадой*.

При построении ЛАЧХ и ЛФЧХ вручную на бумаге в клетку можно воспользоваться приближенными соотношениями октавы и декады, приведенными на рис.б.



а)

Координатная сетка для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ



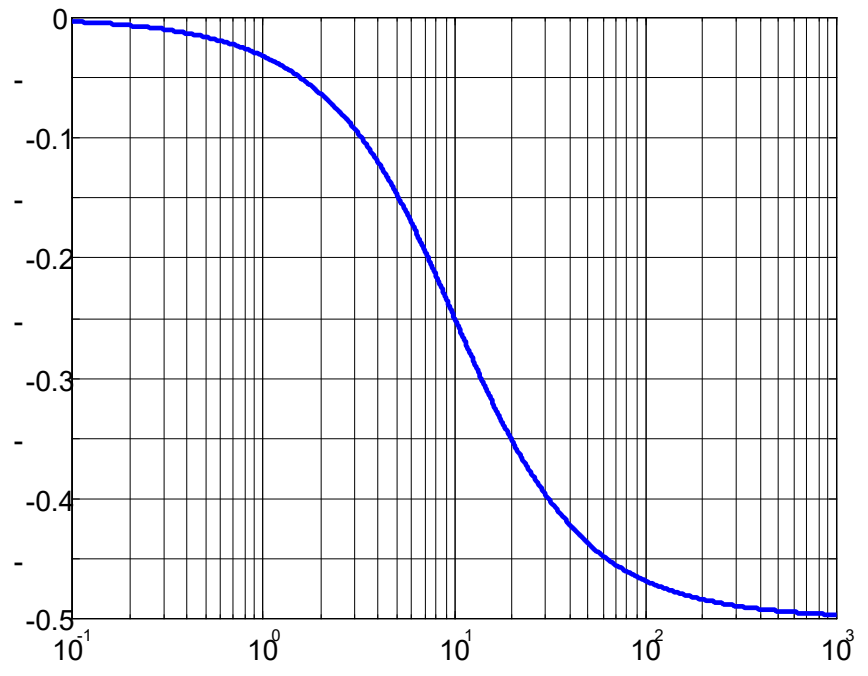
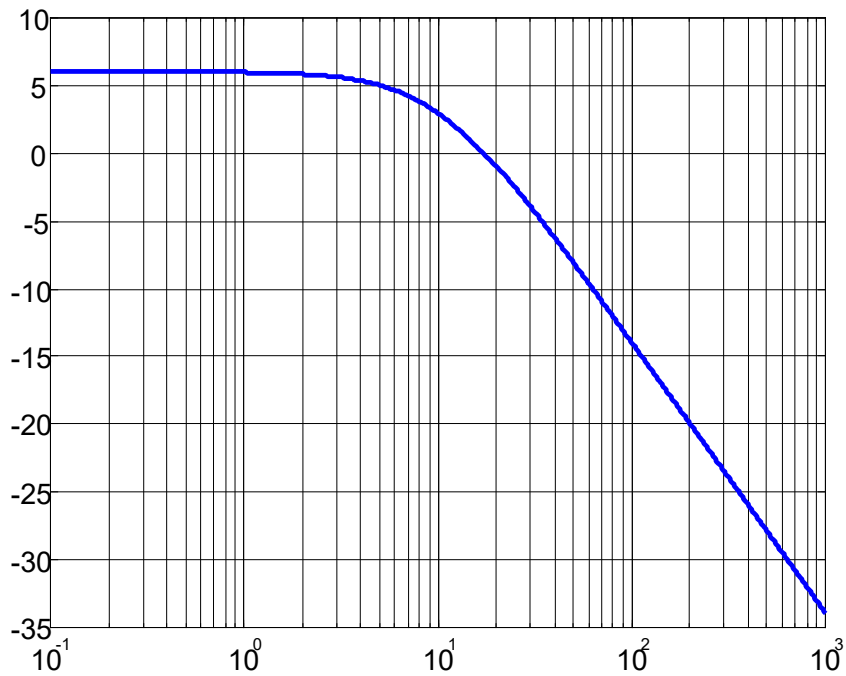
б)

Примечание. Зависимости $L(\lg \omega)$ и $\theta(\lg \omega)$ в одной системе координат практически не строятся. На рис. а показано только соответствие осей координат

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМКНУТЫХ САР

Частотные характеристики и их физический смысл

Например, для рассмотренного выше примера при $k=2$, $T=0,1$ ЛАЧХ и ЛФЧХ имеют вид



ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) для САР