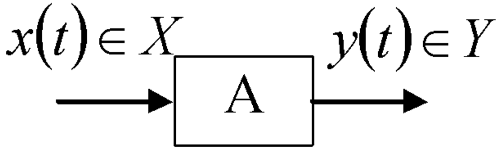
ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Понятие оператора

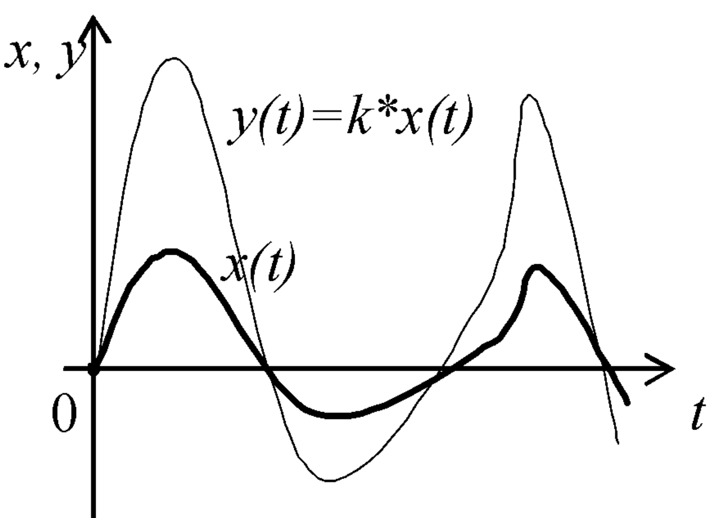
Оператор – любое соответствие между функциями одного множества и функциями другого множества



а)

Например (рис. *а*), пусть А – оператор, отражающий коэффициент передачи (усиления) некоторого устройства

$$\mathrm{A} \equiv k$$



б)

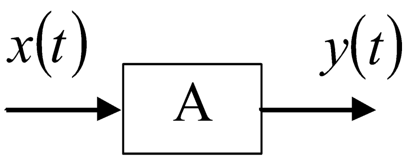
Оператор А связывает все входные функции *x(t)* с выходными *y(t)*, воздействуя на входной сигнал (умножая его в каждый момент времени на коэффициент *k*, т.е. усиливая его). Такое звено в результате формирует выходную функцию *y(t)*, отличающуюся от входной *x(t)* на постоянный множитель (рис. *б*).

Понятие оператора широко используется в ТАУ.

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Понятие оператора

- <u>Оператор дифференцирования</u>



$$\mathbf{A} = T\frac{d}{dt} = Tp$$

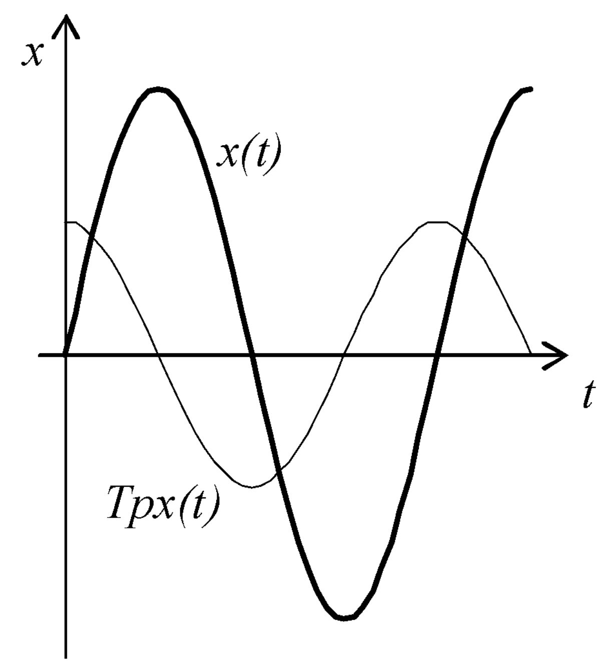
$p = \dfrac{d}{dt}$ – символ (оператор) дифференцирования по времени

T – постоянная времени [с]

Выходная функция

$$y(t) = Tpx(t) = T\frac{dx(t)}{dt}$$

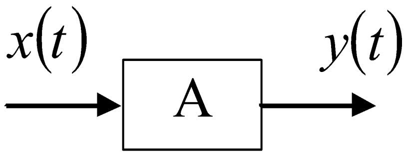
Результатом использования оператора *Tp* есть то, что он, воздействуя на входной сигнал *x(t)*, выдает функцию, равную производной от входного сигнала по времени, в каждый момент *t*, помноженную на коэффициент *T*



ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Понятие оператора

- <u>Оператор интегрирования</u>



$$\boxed{A = \frac{1}{Tp} = \frac{1}{T}\int \square \; dt}$$

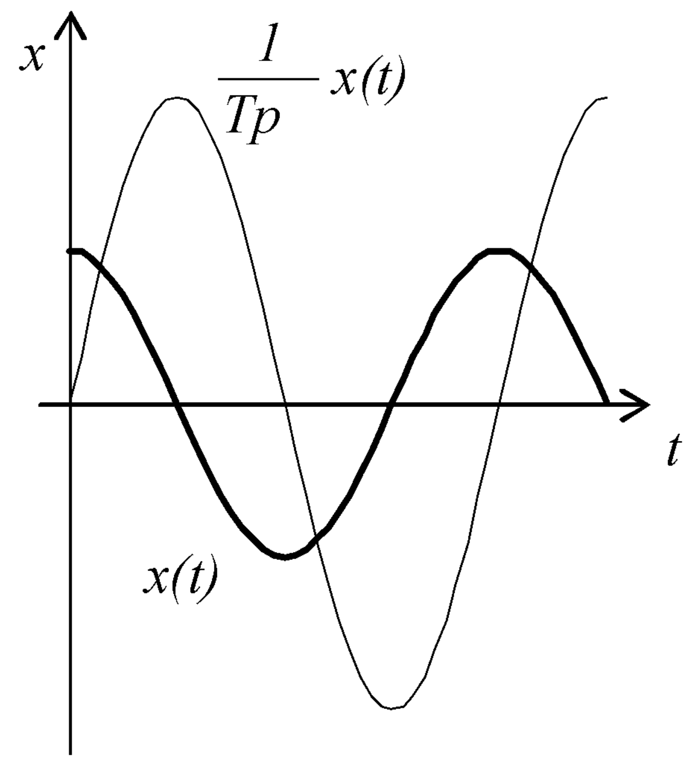
$p^{-1} = \dfrac{1}{p}$ – символ (оператор) интегрирования

T – постоянная времени [с]

Выходная функция

$$y(t) = \frac{1}{Tp}x(t) = \frac{1}{T}\int x(t)dt$$

Результатом использования оператора интегрирования есть то, что он, воздействуя на входной сигнал *x(t)*, выдает для каждого нового значения *t*, новое значение площади.



Математические модели систем

Для того чтобы изучить свойства сложной физической системы и научиться управлять ей, необходимо получить ее математическую модель. Для этого требуется установить все взаимосвязи между переменными, характеризующими поведение системы.

Поскольку все реальные системы по своей природе являются динамическими, то для их описания естественно использовать дифференциальные уравнения.

Если эти уравнения могут быть линеаризованы, то тогда можно воспользоваться преобразованием Лапласа.

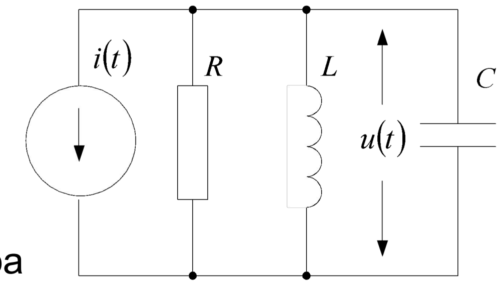
В действительности, сложность системы и игнорирование ряда факторов обуславливают возникновение некоторых допущений, связанных с функционированием данной системы. Поэтому часто бывает полезным игнорировать эти допущения и произвести линеаризацию системы.

В результате на основании физических законов, описывающих поведение эквивалентной линейной системы, мы можем получить систему дифференциальных уравнений.

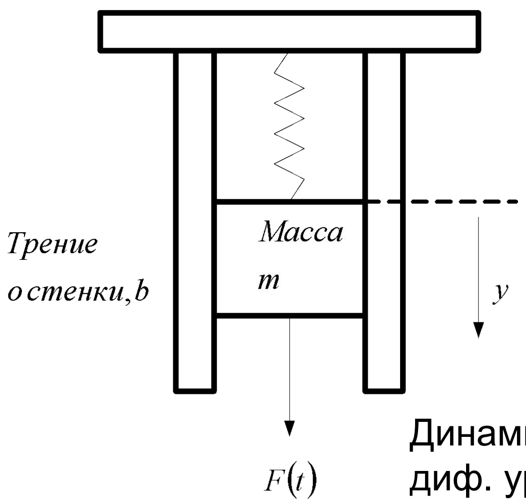
Наконец, используя математический аппарат (преобразование Лапласа), сможем получить решение, характеризующее поведение данной системы.

Математические модели систем

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику физической системы, получаются на основании фундаментальных физических законов. Этот метод в равной степени применим к механическим, электрическим, гидравлическим и термодинамическим системам.

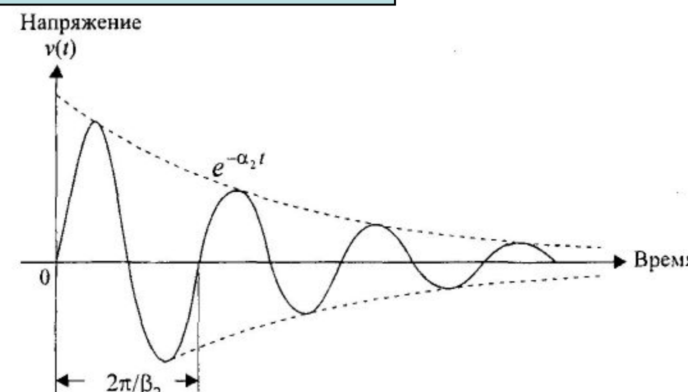


Механический амортизатор (автомобильный) описывается вторым законом Ньютона



Согласно второму закону Кирхгофа

$$C\frac{du(t)}{dt}+\frac{u(t)}{R}+\frac{1}{L}\int_0^t u(t)dt=i(t)$$



Динамика массы *m* описывается диф. уравнением:

$$m\frac{d^2y(t)}{dt^2}+b\frac{dy(t)}{dt}+ky(t)=F(t)$$

k – коэффициент упругости пружины;

b – коэффициент трения;

$v(t)=\frac{dy(t)}{dt}$ - скорость

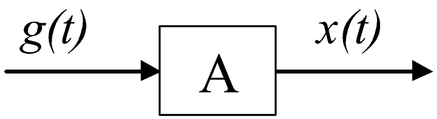
$$m\frac{dv(t)}{dt}+bv(t)+k\int_0^t v(t)dt=F(t)$$

Уравнения эквивалентны – системы подобные

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Математическое определение линейных САР

Для линейных САР, в отличие от нелинейных, справедлив *принцип суперпозиции*



Пусть известно, что
реакцией САР на воздействие $g_1(t)$ является сигнал $x_1(t)=\mathrm{A}g_1(t)$,
реакцией САР на воздействие $g_2(t)$ является сигнал $x_2(t)=\mathrm{A}g_2(t)$,
…
реакцией САР на воздействие $g_n(t)$ является сигнал $x_n(t)=\mathrm{A}g_n(t)$.

САР является линейной, если ее реакция на *линейную комбинацию функций* (сигналов) $g_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$

$$\boxed{g(t)=k_1g_1(t)+k_2g_2(t)+\dots+k_ng_n(t)}$$

где k_i – произвольные действительные числа

является также линейной комбинацией сигналов $x_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$:

$$\boxed{x(t)=k_1x_1(t)+k_2x_2(t)+\dots+k_nx_n(t)}=\mathrm{A}\left[k_1g_1(t)+k_2g_2(t)+\dots+k_ng_n(t)\right]$$

Признаки линейной системы:

1. Реакция линейной САР на сумму сигналов равна сумме реакций на каждый сигнал в отдельности.
2. Если все элементы САР являются линейными, то и САР в целом будет линейной.

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Линеаризация динамических САР

Пусть процессы в реальной САР (как в установившихся, так и в переходных режимах) описывается нелинейным *уравнением динамики*:

$$\boxed{F(x, y, z) = 0}$$

x, y и z – переменные состояния, воздействия на САР, либо их производные.

В установившемся режиме уравнение принимает вид (*уравнение статики*):

$$\boxed{F(x_0, y_0, z_0) = 0}$$

x_0, y_0 и z_0 – значения воздействий в установившемся режиме

В реальном режиме, близкому к заданному установившемуся

$$x = x_0 + \Delta x \qquad y = y_0 + \Delta y \qquad z = z_0 + \Delta z$$

Подстановка этих выражений в исходную функцию (уравнение динамики), после разложения в ряд Тейлора и пренебрежения составляющими высших порядков малости дает

$$F(x, y, z) \approx F(x_0, y_0, z_0) + \left.\frac{\partial F}{\partial x}\right|_{x=x_0} \cdot \Delta x + \left.\frac{\partial F}{\partial y}\right|_{y=y_0} \cdot \Delta y + \left.\frac{\partial F}{\partial z}\right|_{z=z_0} \cdot \Delta z = F(x_0, y_0, z_0) + \Delta F(x, y, z)$$

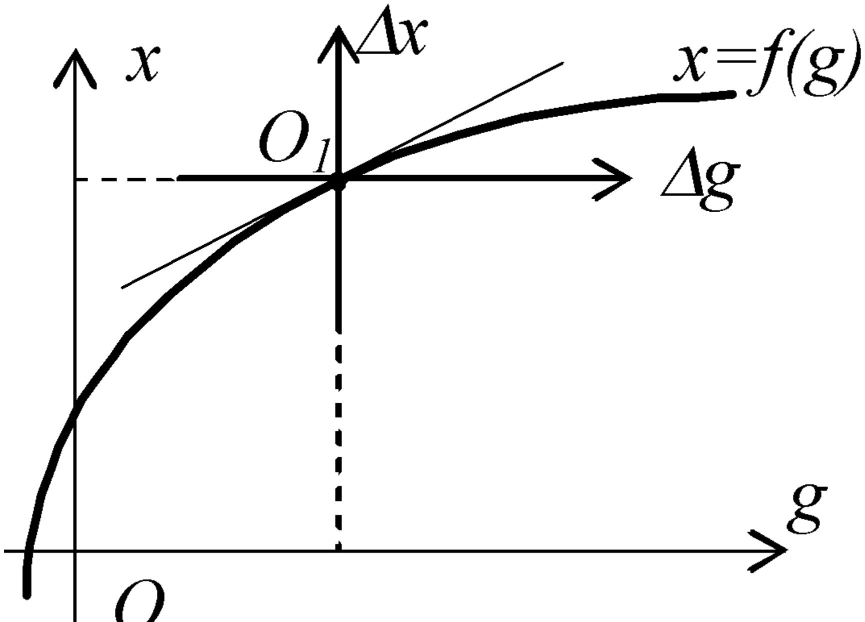
ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Линеаризация динамических САР

Вычитая это уравнение из уравнения статики, получают линеаризованное уравнение САР *в приращениях*:

$$\Delta F(x, y, z) = 0$$

После указанных преобразований САР считается линейной.



Геометрический смысл линеаризации (на примере функции одной переменной) состоит в замене исходной кривой касательной в точке O_1, соответствующей заданному режиму работы, и параллельном переносе начала координат в эту точку.

После линеаризации символы *Δ* приращений переменных обычно опускают.

Пример **Модель маятника**

Рассмотрим колебания маятника, изображенного на рис. Момент, действующий на массу, равен:

$$T = MgL\sin\theta, \tag{2.12}$$

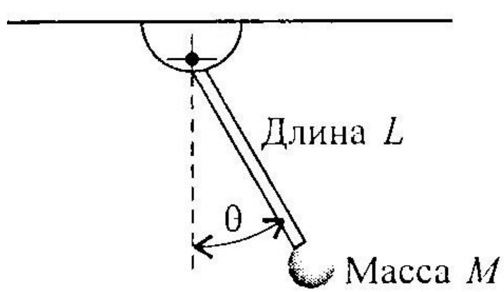
где g — ускорение силы тяжести. Условие равновесия маятника соответствует значению $\theta_0 = 0°$. Нелинейная зависимость между T и θ графически представлена на рис. Вычисление первой производной в точке равновесия дает линейную аппроксимацию уравнения (2.12), которая имеет вид:

$$T - T_0 \approx MgL \frac{\partial \sin\theta}{\partial\theta}\Big|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0),$$

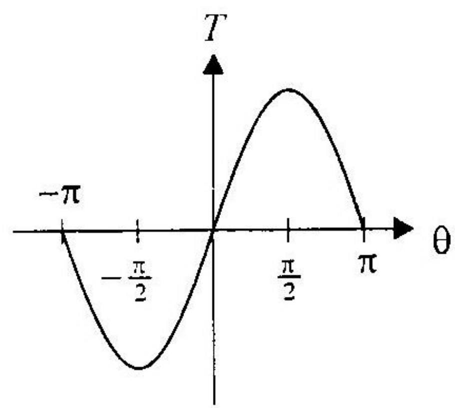
где $T_0 = 0$. Следовательно, мы имеем:

$$T = MgL(\cos 0°)(\theta - 0°) = MgL\theta. \tag{2.13}$$

Подобная аппроксимация является достаточно приемлемой в диапазоне $-\pi/4 \le \theta \le \pi/4$. Например, колебания линейной модели в диапазоне ±30° от положения равновесия отличаются всего на 2% от действительных колебаний маятника.

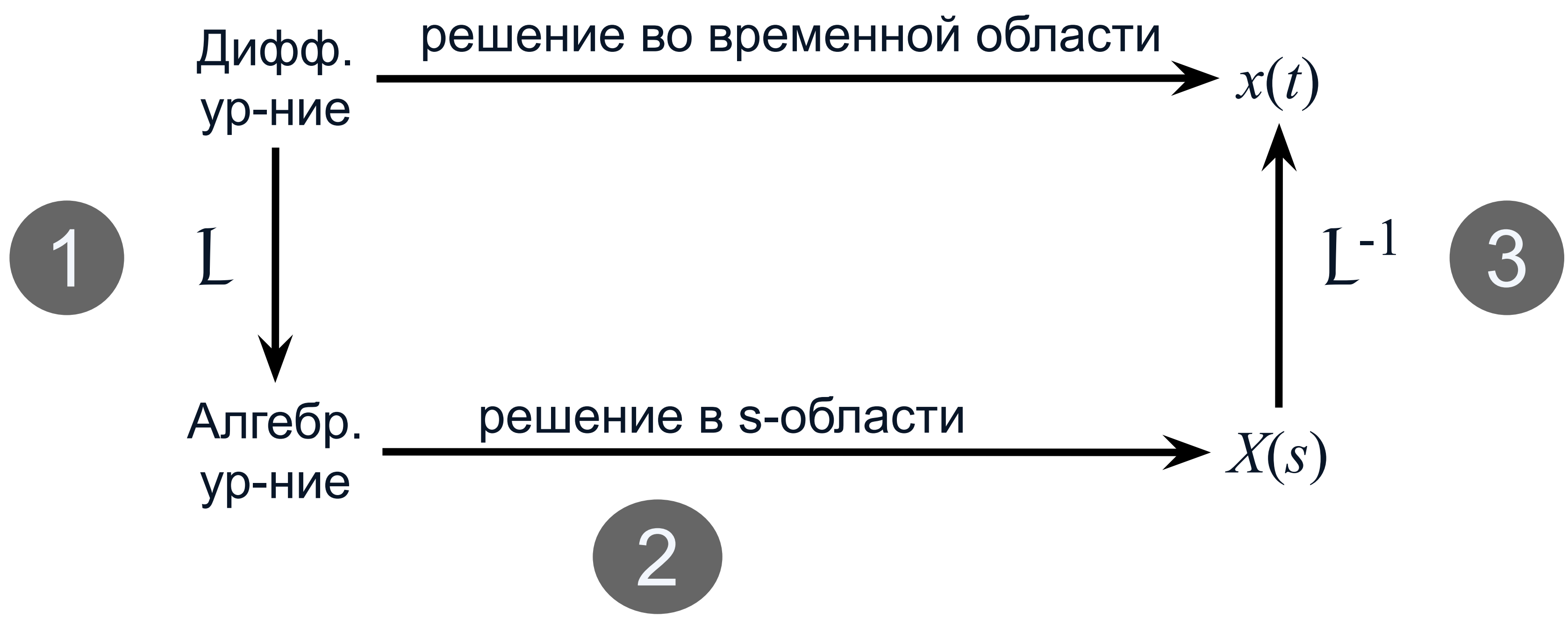


а)



б)

Преобразование Лапласа



ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Преобразование Лапласа

Преобразованием Лапласа называют соотношение:

$$F(p) = \mathrm{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

которое ставит функции *f(t)* действительного переменного в соответствие функцию *F(p)* комплексного переменного $p = \alpha + j\omega$

Функция *f(t)*, подвергающаяся преобразованию Лапласа, называется *оригиналом*, и должна обладать следующими свойствами:

- *f(t)* определена и кусочно-дифференцируема на интервале $[0;\infty)$
- *f(t)* ≡ 0 при *t<0*;
- существуют такие положительные числа *c* и *M*, что при любом 0 ≤ *t* ≤ ∞ выполняется неравенство $|f(t)| < Me^{ct}$

Функция *F(p)* называется *изображением*. Оператор L называют *оператором преобразования Лапласа*.

Обратным преобразованием Лапласа называют соотношение:

$$f(t) = \mathrm{L}^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} F(p) e^{pt} dp$$

определяющее по известному изображению его оригинал

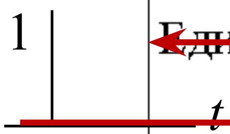
L^{-1} – *оператор обратного преобразования Лапласа*.

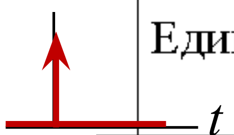
Обратное преобразование Лапласа обычно находят путем разложения F(p) на простые дроби с помощью правила Хевисайда. Этот метод полезен при анализе и синтезе систем управления, т.к. позволяет легко выявить влияние каждого корня характеристического уравнения системы.

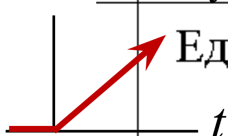
ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Преобразование Лапласа

Все физически реализуемые сигналы имеют преобразование Лапласа.







Преобразования Лапласа [6]

Название функции	$f(t)$	$F(p)$	Название функции	$f(t)$	$F(p)$
Единичная ступенчатая функция	$1(t)$	$\frac{1}{p}$	Синусоида	$\sin bt$	$\frac{b}{p^2+b^2}$
Единичная импульсная функция	$\delta(t)$	1	Косинусоида	$\cos bt$	$\frac{p}{p^2+b^2}$
Единичная линейная функция	t	$\frac{1}{p^2}$	Затухающая синусоида	$e^{-at}\sin bt$	$\frac{b}{(p+a)^2+b^2}$
Степенная функция	t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$	Затухающая косинусоида	$e^{-at}\cos bt$	$\frac{p+a}{(p+a)^2+b^2}$
Экспонента	e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$	Расходящаяся синусоида	$t\sin bt$	$\frac{2bp}{(p^2+b^2)^2}$
Экспонента n-го порядка	$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(p+a)^{n+1}}$	Расходящаяся косинусоида	$t\cos bt$	$\frac{p^2-b^2}{(p^2+b^2)^2}$

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

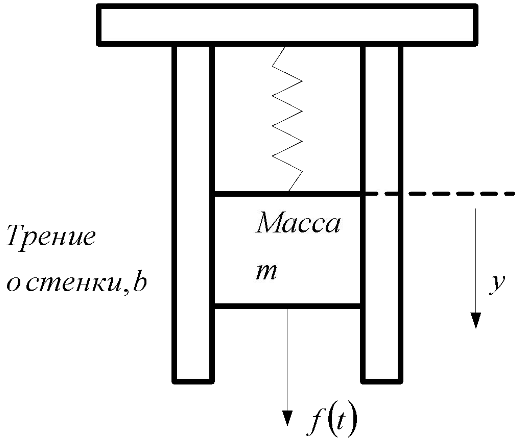
Преобразование Лапласа

Теоремы преобразования Лапласа [6]

Название операции	Формулировка теоремы	Название операции	Формулировка теоремы
Умножение оригинала на коэффициент k	$\mathrm{L}\left[k \cdot f(t)\right] = k \cdot F(p)$, $k=const$	Чистое запаздывание	$\mathrm{L}\left[f(t) \cdot 1(t - t_0)\right] = e^{-t_0 p} F(p)$
Сумма	$\mathrm{L}\left[f_1(t) + f_2(t)\right] = F_1(p) + F_2(p)$	Начальное значение	$\lim\limits_{t \to 0} f(t) = \lim\limits_{s \to \infty} pF(p)$
Производная	$\mathrm{L}\left[\dfrac{df(t)}{dt}\right] = pF(s) - f(0)$	Конечное значение	$\lim\limits_{t \to \infty} f(t) = \lim\limits_{s \to 0} pF(p)$
Производная n-го порядка	$\mathrm{L}\left[\dfrac{df^n(t)}{dt^n}\right] = p^n F(s) - p^{n-1} f(0) - $ $- p^{n-2} f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$	Умножение оригинала на экспоненту	$\mathrm{L}\left[e^{-at} f(t)\right] = F(p + a)$
Интеграл	$\mathrm{L}\left[\int\limits_0^t f(\tau) d\tau\right] = \dfrac{F(p)}{p}$	Интеграл свертки	$\mathrm{L}^{-1}\left[F_1(p) F_2(p)\right] = \int\limits_0^t f_1(t - \tau) f_2(\tau) d\tau =$ $= \int\limits_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau$

Преобразование Лапласа

Механический амортизатор



Динамика массы *m* описывается дифф. уравнением:

$$m\frac{d^2y(t)}{dt^2}+b\frac{dy(t)}{dt}+ky(t)=f(t)$$

Необходимо получить решение этого уравнения, т.е. выражение y(t).

Преобразование Лапласа для этого уравнения имеет вид:

$$m\left[p^2Y(p)-py_0-\frac{dy(0)}{dt}\right]+b\left[pY(p)-y_0\right]+kY(p)=F(p)$$

Если $f(t)=0$ получим:

$$mp^2Y(p)-mpy_0+bpY(p)-by_0+kY(p)=0$$

Выражая *Y(p)* получим:

$$\boxed{Y(p)=\frac{(mp+b)y_0}{mp^2+bp+k}=\frac{H(p)}{Q(p)}}$$

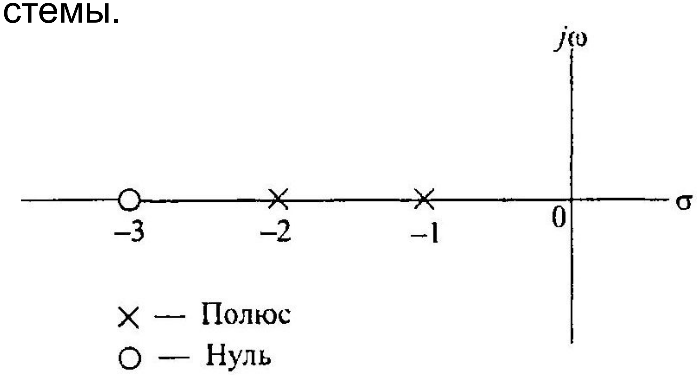
Если полином *Q(p)* приравнять к нулю, то получим характеристическое уравнение. Его корни определяют характер движения системы. Корни характеристического уравнения также называют полюсами системы. Корни полинома *H(p)* называют нулями системы.

Например, выражение *Y(p)* имеет нуль $p=-b/m$

В полюсах функция *Y(p)* обращается в бесконечность, а в нулях она становится равной нулю. Расположение полюсов и нулей на комплексной плоскости определяет характер собственного (свободного) движения системы.

Когда $k/m=2$
$b/m=3$

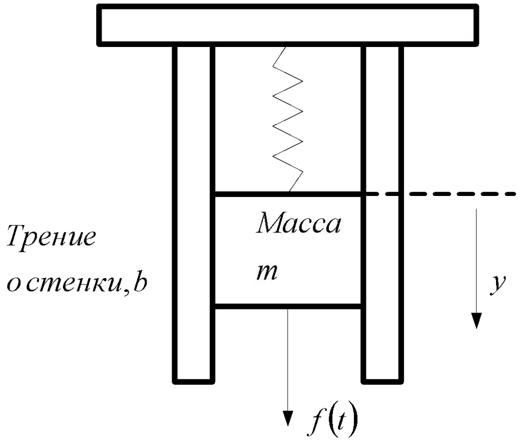
$$Y(p)=\frac{(p+3)y_0}{(p+1)(p+2)}$$



Расположение полюсов и нуля на комплексной плоскости

Преобразование Лапласа

Механический амортизатор



Рассмотрим систему масса-пружина для случая недодемпфированного движения. Выражение для *Y(p)* можно записать в виде:

$$Y(p) = \frac{(p + b/M)y_0}{p^2 + (b/M)p + (k/M)} = \frac{(p + 2\zeta\omega_n)y_0}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2},$$

где ξ - безразмерный коэффициент затухания;

ω_n - собственная частота колебаний системы

Корни характеристического уравнения равны: $s_1, s_2 = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1},$

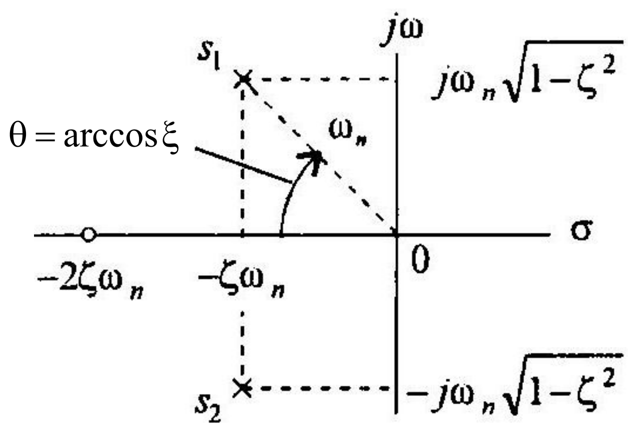
где $\omega_n = \sqrt{k/M}$ $\qquad \xi = b/\sqrt{kM}.$

Если $\xi > 1,$ то корни являются вещественными; $\xi < 1$ корни являются комплексно-сопряженными.

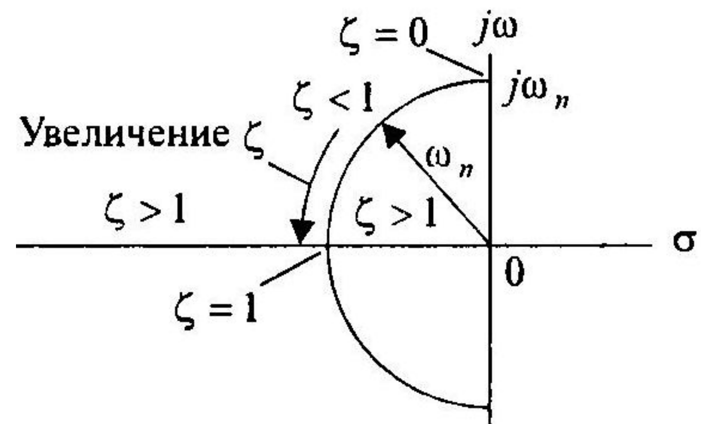
При $\xi = 1$ корни являются вещественными и кратными, - соответствует «критическому затуханию».

Если $\xi < 1$, то реакция системы является недодемпфированной, и $s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$

При изменении ξ и сохранении постоянным значения ω_n комплексно-сопряженные полюсы перемещаются по окружности. Переходная характеристика все более приобретает колебательный характер по мере того, как полюсы приближаются к мнимой оси при $\xi \to 0$



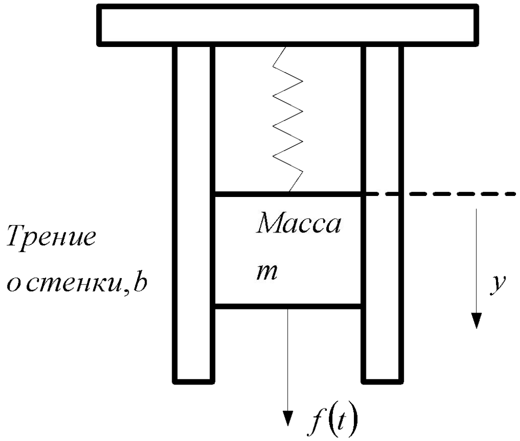
Расположение полюсов и нуля функции *Y(p)*



Перемещение полюсов при изменении ξ и условии $\omega_n = const$

Преобразование Лапласа

Механический амортизатор

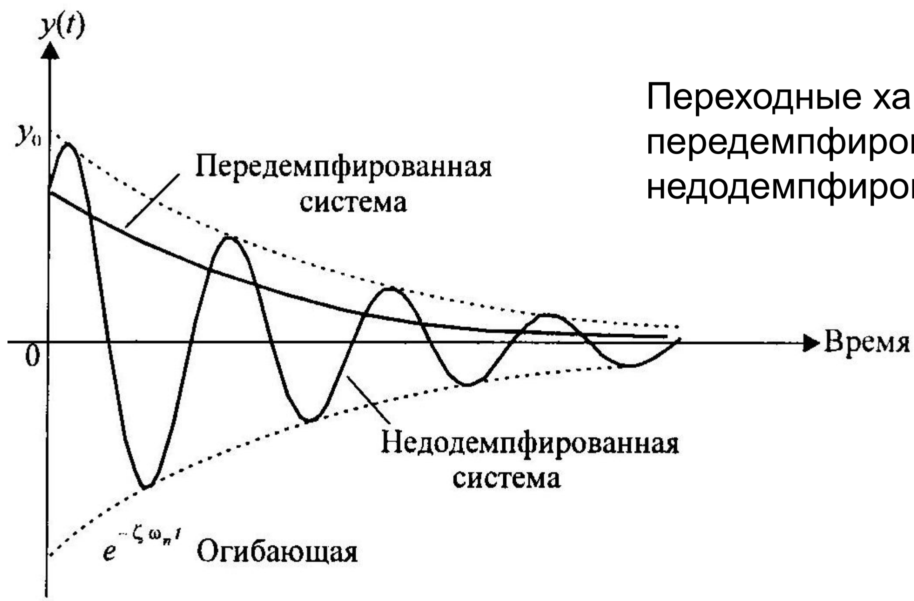


Решение можно получить с помощью таблицы обратного преобразования Лапласа

Введя обозначение $\sqrt{1-\xi^2}=\beta$, получим:

$$y(t)=k_1e^{p_1t}+k_2e^{p_2t}=\frac{y_0}{2\sqrt{1-\xi^2}}(e^{j(\theta-\pi/2)}e^{-\xi\omega_n t}e^{j\omega_n\beta t}+e^{j(\pi/2-\theta)}e^{-\xi\omega_n t}e^{-j\omega_n\beta t})=$$

$$=\frac{y_0}{\sqrt{1-\xi^2}}e^{-j\omega_n t}\sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}t+\theta)$$



Переходные характеристики для случаев передемпфированной ($\xi>1$) и недодемпфированной ($\xi<1$) системы

Переходной характеристике при $\xi<1$ свойственно уменьшение со временем амплитуды колебаний, поэтому она носит название затухающих колебаний.

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Передаточная функция

Передаточной функцией САР называется отношение изображения выходной переменной к изображению входной переменной при нулевых начальных условиях.

П.ф. системы однозначно описывает динамическую связь между переменными.

Пусть САР описывается ДУ:

$$\boxed{Q(p)x(t) = H(p)u(t)}$$

где $u(t)$ – входное воздействие; $x(t)$ – выходная переменная;

$H(p) = b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m$ – оператор воздействия;

$Q(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n$ – собственный оператор САР.

p – оператор дифференцирования

Применим к обеим частям этого уравнения преобразование Лапласа, используя свойство линейности преобразования:

$$a_0 \mathrm{L}[x] + a_1 \mathrm{L}[x'] + a_2 \mathrm{L}[x''] + \dots + a_n \mathrm{L}\left[x^{(n)}\right] = b_0 \mathrm{L}[u] + b_1 \mathrm{L}[u'] + b_2 \mathrm{L}[u''] + \dots + b_m \mathrm{L}\left[u^{(m)}\right]$$

При нулевых начальных условиях

$$\left(a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n\right) X(p) = \left(b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m\right) U(p)$$

Отсюда находим передаточную функцию (п.ф.)

p – комплексная переменная

$$\boxed{W(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}}$$

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Передаточная функция

Параметры передаточной функции

$$W(p)=\frac{X(p)}{U(p)}=\frac{b_0+b_1p+b_2p^2+\dots+b_mp^m}{a_0+a_1p+a_2p^2+\dots+a_np^n}$$

П.ф. системы описывает поведение системы в терминах вход-выход и не несет никакой информации о внутренних переменных и характере их изменения.

Характеристический полином п.ф. – полином знаменателя *Q(p)*;

Порядок п.ф. – степень полинома знаменателя *n*;

Относительный порядок п.ф. – разность *n-m* между порядком полиномов знаменателя и числителя;

Нули п.ф. – значения переменной *p*, при которых п.ф. обращается в нуль, т.е. корни уравнения

H(p)=0

Полюсы п.ф. – значения переменной *p*, при которых п.ф. обращается в бесконечность, т.е. корни уравнения

Q(p)=0,

называемого *характеристическим уравнением*.

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Передаточная функция

<u>Свойства передаточной функции</u>

1. Можно показать, что п.ф. САР (или звена) равна отношению оператора воздействия к собственному оператору после замены в указанных операторах оператора дифференцирования на комплексную переменную *p* и сокращения общих множителей в числителе и знаменателе (если таковые имеются):

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

Данное утверждение справедливо *только для стационарных САР*.

2. П.ф. САР (или звена) не может иметь равные между собой нули и полюсы.

3. П.ф. САР (или звена) в общем случае не может служить математическим описанием САР (при произвольных начальных условиях).

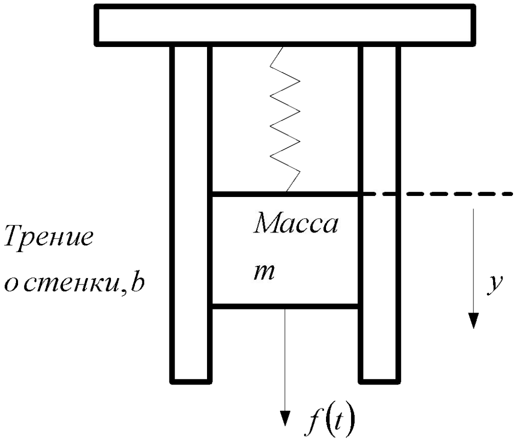
4. Для работоспособных ОУ и прочих элементов САР, а также для САР в целом необходимым является выполнение *условия физической реализуемости*

$$\boxed{m \le n}$$

причем реально отношение равенства возможно лишь применительно к отдельным элементам САР в случаях *m=n=0* (реже 1, очень редко 2).

Передаточная функция

Механический амортизатор

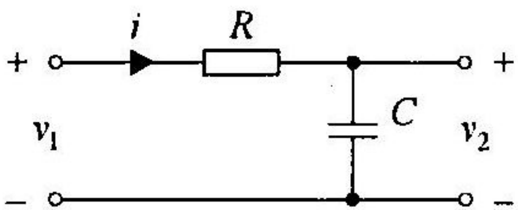


Передаточная функция системы масса-пружина получается, если в исходном уравнении все начальные условия положить равными нулю:

$$mp^2Y(p)+bpY(p)+kY(p)=F(p)$$

Откуда находим передаточную функцию

$$\frac{выход}{вход}=G(p)=\frac{Y(p)}{F(p)}=\frac{1}{Mp^2+bp+k}$$



Передаточная функция RC-цепи получается путем записи в операторной форме уравнений Кирхгофа относительно напряжений:

$$V_1(p)=(R+\frac{1}{Cp})I(p) \qquad V_2(p)=I(p)\frac{1}{Cp}$$

Выражая *I(p)* и подставляя его в $V_2(p)$, получим: $V(p)=\frac{1/Cp}{R+1/Cp}V_1(p)$

Тогда передаточная функция будет иметь вид:

$$G(p)=\frac{V_2(p)}{V_1(p)}=\frac{1}{RCp+1}=\frac{1}{\tau p+1}=\frac{1/\tau}{p+1/\tau}$$

где $\tau=RC$ есть постоянная времени цепи.

Единственный полюс функции *G(p)* равен $p=-1/\tau$

П.ф. можно получить сразу, если рассматривать цепь, как обычный делитель напряжения:

$$\frac{V_2(p)}{V_1(p)}=\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)+Z_2(p)}$$

где $Z_1(p)=R \qquad Z_2(p)=1/Cp$

ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САР

Математическое описание и передаточные функции двигателя постоянного тока как объекта управления

Для математического описания САР выделяют ее отдельные элементы, которые обладают однонаправленными свойствами: выходной сигнал формируется в зависимости от входного, и не влияет на него. Согласно с таким принципом однонаправленности, в САР можно выделить следующие элементы:

1. Генератор (Г). В качестве входа рассматриваем напряжение возбуждения $U_{ВГ}$, в качестве выхода – ЭДС генератора $E_Г$. Условно записываем:

$$U_{ВГ} \rightarrow E_Г$$

(вход → выход)

2. Двигатель (Д): $E_Г \rightarrow \omega$

3. Тахогенератор (ТГ):

$\omega \rightarrow U_{ТГ}$

4. Усилитель мощности (УМ) считаем идеальным (внутреннее сопротивление равно нулю):

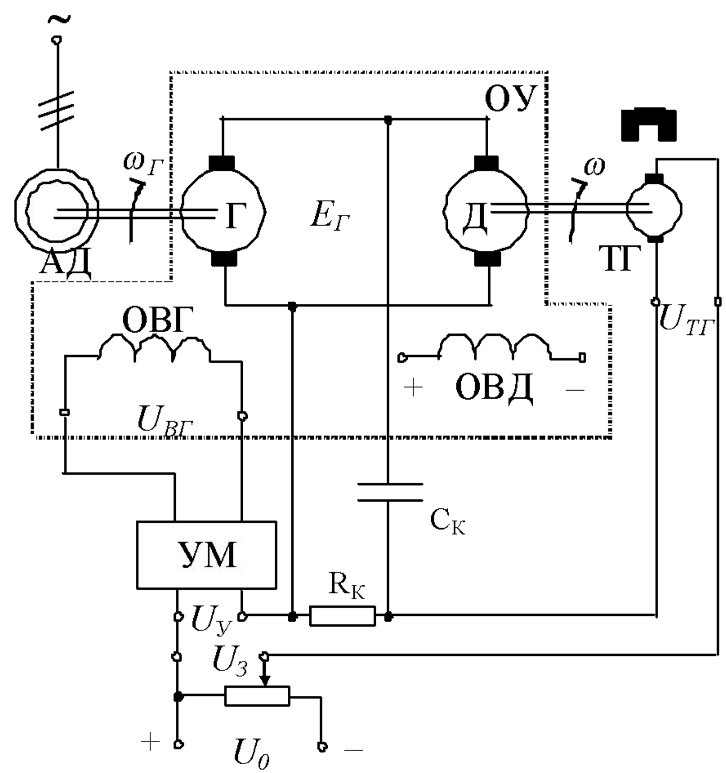
$U_У \rightarrow U_{ВГ}$

5. Узел сравнения (электрическая цепь) (УС):

$U_У = {}_{U З} - U_{ТГ} - U_К$

6. Корректирующая цепь (КЦ):

$E_Г \rightarrow U_К$



САР регулирования скорости ДПТ по схеме «генератор – двигатель»

Генератор

$$U_{ВГ} = i_{ВГ}R_{ВГ} + L_{ВГ}\frac{di_{ВГ}}{dt} = i_{ВГ}R_{ВГ} + 2z_pW_{ВГ}\frac{d\Phi}{dt}$$

$$U_{ВГ} = \frac{R_{ВГ}}{k_{ВГ}}\Phi + 2z_pW_{ВГ}\frac{d\Phi}{dt}$$

$$E_Г = k_{КГ}\Phi\omega_Г \qquad U_{ВГ} = \frac{1}{k_Г}(T_{ВГ}p+1)E_Г$$

Двигатель

$$E_Г - E_Д = iR_{Я\Sigma} + L_{Я\Sigma}\frac{di}{dt}$$

$$J\frac{d\omega}{dt} = M - M_C$$

$$\left(T_ЯT_Mp^2 + T_Mp + 1\right)\omega = \frac{1}{c_Д}E_Г$$

Тахогенератор

$$U_{ТГ} = k_{ТГ}\omega$$

Усилитель мощности

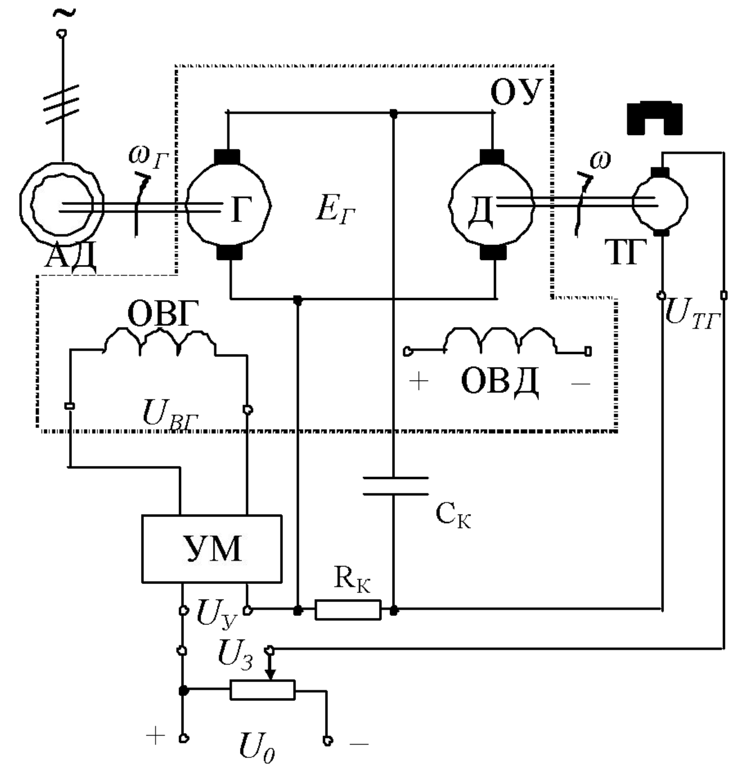
$$U_{ВГ} = k_УU_У$$

Узел сравнения

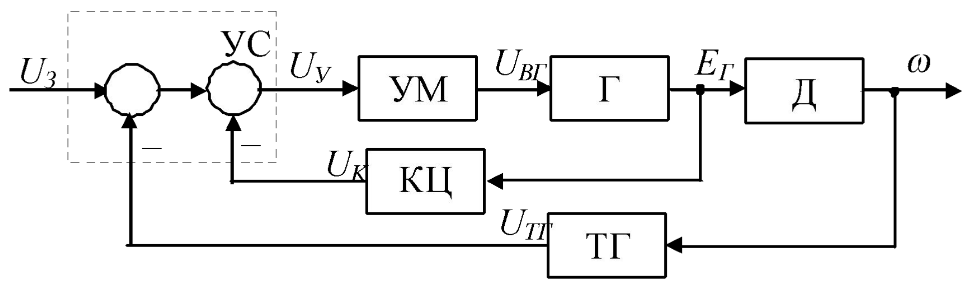
$$U_У = U_З - U_{ТГ} - U_K$$

Цепь корректирования

$$(T_Kp+1)U_K = T_KpE_Г$$



САР регулирования скорости ДПТ по схеме «генератор – двигатель»



Блок-схема САР

Генератор

$$U_{ВГ} = \frac{1}{k_Г}(T_{ВГ}p+1)E_Г \qquad W_Г(s) = \frac{E_Г(s)}{U_{ВГ}(s)} = \frac{k_Г}{T_{ВГ}s+1}$$

Двигатель

$$(T_Я T_М p^2 + T_М p + 1)\omega = \frac{1}{c_Д}E_Г \qquad W_Д(s) = \frac{\omega(s)}{E_Г(s)} = \frac{1/c_Д}{T_Я T_М s^2 + T_М s + 1}$$

Тахогенератор

$$U_{ТГ} = k_{ТГ}\omega \qquad W_{ТГ}(s) = \frac{U_{ТГ}(s)}{\omega(s)} = k_{ТГ}$$

Усилитель мощности

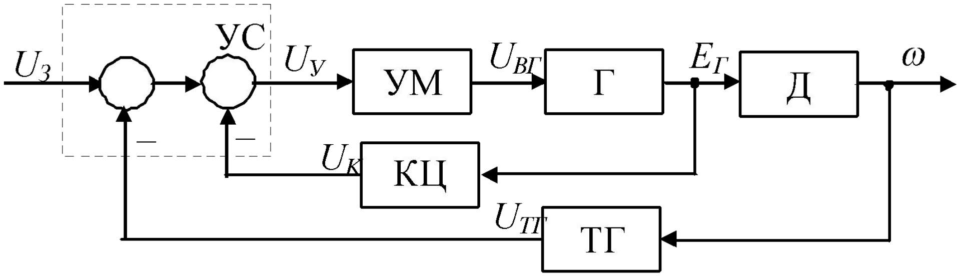
$$U_{ВГ} = k_У U_У \qquad W_{УМ}(s) = \frac{U_{ВГ}(s)}{U_У(s)} = k_У$$

Узел сравнения

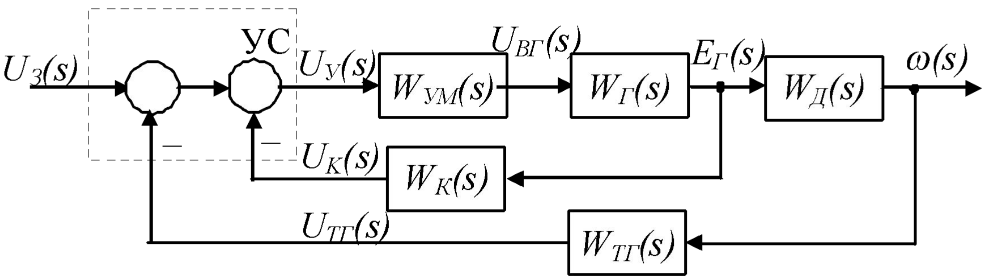
$$U_У = U_З - U_{ТГ} - U_К \qquad U_У(s) = U_З(s) - U_{ТГ}(s) - U_К(s)$$

Цепь корректирования

$$(T_К p + 1)U_К = T_К p E_Г \qquad W_Г(s) = \frac{U_К(s)}{E_Г(s)} = \frac{T_К s}{T_К s + 1}$$



Блок-схема САР



Структурная схема САР