Лекции №№ 7 – 8 (17 марта 2022)

продолжение п. 3.2. Характеристики динамических звеньев (систем).

По определению:
Передаточная функция звена (САУ) – это отношение изображений по Лапласу выходной и входной величин звена (САУ) при нулевых предначальных условиях ($y(-0) = y'(-0) = \ldots = y^{(n-1)}(-0) = 0$, $x(-0) = x'(-0) = \ldots = x^{(m-1)}(-0) = 0$):

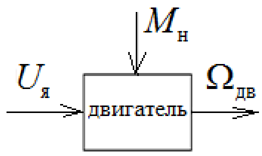
$$\boxed{W(p) = \left.\frac{Y(p)}{X(p)}\right|_{ПНУ=0} \quad \Rightarrow \quad Y(p) = W(p)\,X(p)}$$

Пример 2: найти передаточные функции по управляющему и по возмущающему воздействиям двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением и якорным управлением, рассмотренного в п. 2.4.

Дано: ММ ДПТ:

$$\begin{cases} U_я(t) = R_я I_я(t) + L_я \dfrac{dI_я(t)}{dt} + C_e \cdot \Omega_{дв}(t) & \text{– уравнение электрического равновесия якорной цепи} \\ J\dfrac{d\Omega_{дв}(t)}{dt} + M_н(t) = C_м \cdot I_я(t) & \text{– уравнение равновесия моментов на валу двигателя} \end{cases}$$

(уравнения (1) и (2) из п. 2.4)



$U_я$ – напряжение, подаваемое на якорную обмотку электродвигателя – управляющее воздействие,

$M_н$ – момент нагрузки на валу двигателя – возмущающее воздействие,

$\Omega_{дв}$ – скорость вращения вала двигателя – выходная величина.

Решение:

Перейдем к изображениям по Лапласу при нулевых предначальных условиях:

$$\begin{cases} U_я(p) = (R_я + L_я p) I_я(p) + C_e \cdot \Omega_{дв}(p) \\ Jp\Omega_{дв}(p) + M_н(p) = C_м \cdot I_я(p) \end{cases}$$

Выразим из второго уравнения данной системы ток в обмотке якоря $I_я(p)$ и подставим его в первое уравнение:

$$U_я(p) = \frac{R_я + L_я p}{C_м}(Jp\Omega_{дв}(p) + M_н(p)) + C_e\Omega_{дв}(p) = \left(C_e + \frac{(R_я + L_я p)Jp}{C_м}\right)\Omega_{дв}(p) + \frac{R_я + L_я p}{C_м} M_н(p) \qquad (*)$$

Передаточная функция двигателя *по управляющему воздействию* находится следующим образом:

$$W_{\text{дв.у.}}(p) = \left.\frac{\Omega_{\text{дв}}(p)}{U_{\text{я}}(p)}\right|_{\substack{ПНУ=0,\\ M_{\text{н}}(p)=0}}$$ (при ее расчете $M_{\text{н}}(p)$ в правой части равенства (*) кладется равным нулю)

<u>Передаточная функция двигателя *по возмущающему воздействию*</u> находится следующим образом:

$$W_{\text{дв.в.}}(p) = \left.\frac{\Omega_{\text{дв}}(p)}{M_{\text{н}}(p)}\right|_{\substack{ПНУ=0,\\ U_{\text{я}}(p)=0}}$$ (при ее расчете $U_{\text{я}}(p)$ в левой части равенства (*) кладется равным нулю)

$$W_{\text{дв.у.}}(p) = \frac{1}{C_e + \dfrac{(R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p)Jp}{C_{\text{м}}}} = \frac{1/C_e}{1 + \dfrac{JL_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e}p^2 + \dfrac{JR_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e}p}$$

Обозначим $1/C_e = K_{\text{дв}}$ – <u>коэффициент усиления</u> двигателя [по скорости],

$\dfrac{JR_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e} = T_{\text{м}}$ – <u>электромеханическая постоянная времени</u> двигателя (постоянная времени механических процессов),

$\dfrac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = T_{\text{э}}$ – <u>электромагнитная постоянная времени </u>(постоянная времени электромагнитных процессов), тогда

$$\boxed{W_{\text{дв.у.}}(p) = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1}}$$

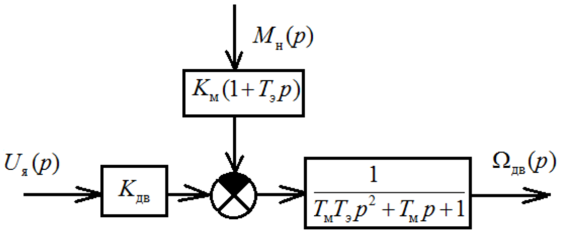
$$W_{\text{дв.в.}}(p) = \left.\frac{\Omega_{\text{дв}}(p)}{M_{\text{н}}(p)}\right|_{\substack{ПНУ=0,\\ U_{\text{я}}(p)=0}} = -\frac{R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p}{C_{\text{м}}\left(C_e + \dfrac{(R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p)Jp}{C_{\text{м}}}\right)} = -\frac{R_{\text{я}}(1 + \dfrac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}p)}{C_{\text{м}}C_e\left(1 + \dfrac{JL_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e}p^2 + \dfrac{JR_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e}p\right)}$$

или, с учетом введенных обозначений:

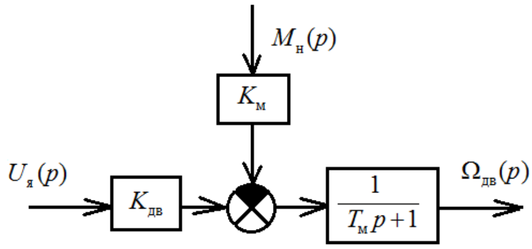
$$\boxed{W_{\text{дв.в.}}(p) = -\frac{K_{\text{м}}(1 + T_{\text{э}}p)}{T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1}},$$

где $K_{\text{м}} = \dfrac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}C_e}$ – <u>коэффициент пропорциональности между моментом и скоростью.</u>

<u>Структурная схема</u> ДПТ с независимым возбуждением и якорным управлением:



Обычно $T_м \gg T_э$ (т.к. скорость протекания электромагнитных процессов существенно превышает скорость протекания механических процессов), поэтому постоянной времени $T_э$ пренебрегают и $T_м$ характеризует быстродействие двигателя в процессе разгона. Тогда упрощенная структурная схема ДПТ будет иметь вид:

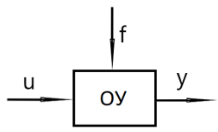


Глава IV Структурные схемы линейных непрерывных систем автоматического управления (ЛНСАУ) и их преобразование

4.1. Элементы структурных схем. Способы соединения звеньев в САУ.

Опр. Структурной схемой называется графическое изображение математической модели системы автоматического управления, которое устанавливает связь между входной и выходной величинами.

Было ранее:
Функциональная схема САУ – это схема, в которой каждому функциональному элементу системы соответствует определенное звено (т.е. элемент).
Например, общая функциональная схема объекта управления:



В отличие от функциональной схемы на структурной схеме каждой математической операции преобразования сигнала соответствует определенное звено (элемент).

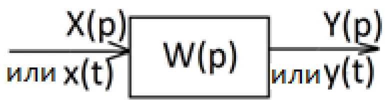
Любая САУ для упрощения ее расчета и анализа работы представляется в виде структурной схемы.

Элементы структурных схем

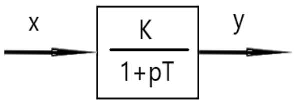
1. Динамическое звено (ДЗ) – это элемент структурной схемы, в котором входная и выходная величины связаны дифференциальным уравнением.

Альтернативное определение: ДЗ – это отображение [линейной] операции преобразования некоторого сигнала x в переменную y в соответствии с дифференциальным уравнением.

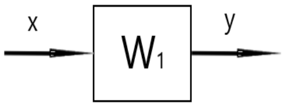
ДЗ на структурной схеме обозначается в виде прямоугольника с указанием входных и выходных переменных, а также передаточной функции внутри него:



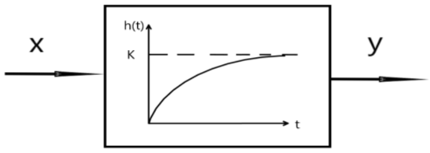
Например,



или



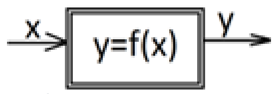
Входные и выходные переменные записывают в виде изображений по Лапласу, если передаточные функции задают в форме изображений. Если же передаточные функции задают в операторной форме или звенья описывают дифференциальными уравнениями, то x и y записывают в виде оригинала (т.е. во временной области). Иногда вместо $W(p)$ указывают характеристику звена. Например:



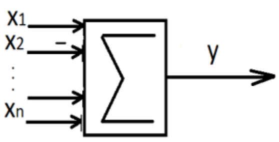
(На данном рисунке приведена переходная характеристика инерционного звена.)

Справочно (т.к. в данной главе рассматриваются структурные схемы только <u>линейных</u> САУ):

<u>Нелинейное звено</u> на структурной схеме обозначается следующим образом:

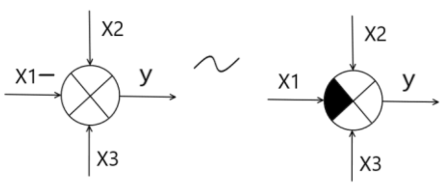


2. <u>Сумматор</u> – отображение операции суммирования:



$$y = x_1 - x_2 + \ldots + x_n$$

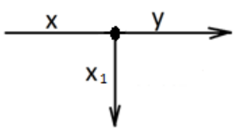
Если число входов сумматора ≤ 3, то он обозначается в виде круга, разделенного на секторы:



Сектор сумматора, к которому подводится величина со знаком «-», затемняют или просто ставят знак «-» перед входом сумматора.

$$y = -x_1 + x_2 + x_3$$

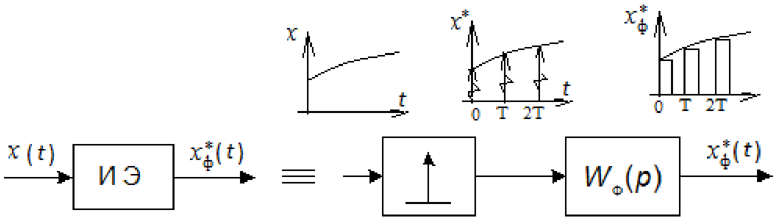
3. <u>Узел</u> (точка разветвления) – отображение операции тождества:



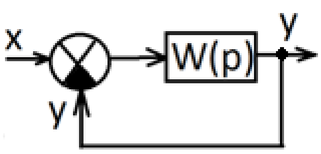
$$y \equiv x \equiv x_1$$

Справочно (т.к. в данной главе рассматриваются структурные схемы только <u>непрерывных</u> САУ):

<u>Импульсный элемент</u> (осуществляет квантование непрерывного сигнала в импульсных САУ) на структурной схеме представляется в виде двух звеньев: идеального импульсного элемента (ИИЭ), генерирующего последовательность δ–функций, и формирователя (динамического звена с передаточной функцией $W_{\phi}(p)$), на выходе которого уже последовательность импульсов определенной формы.



(единичный импульс внутри ИИЭ условно показан стрелкой единичной высоты; дискретность сигнала $x^*(t)$ отмечена звездочкой.)

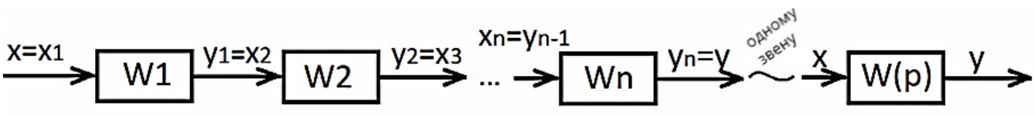
Пример структурной схемы: 

– структурная схема замкнутой САУ

Способы соединения звеньев

Существует 3 вида (способа) соединения звеньев в системе автоматического управления:

1). <u>Последовательное соединение</u> – такое соединение, при котором выходная величина предшествующего звена является входной величиной последующего звена:



Найдем $W(p)=\dfrac{Y(p)}{X(p)}$ – эквивалентную передаточную функцию.

$$Y_1(p)=W_1(p)\cdot X(p)$$
$$Y_2(p)=W_2(p)\cdot X_2(p)=W_2(p)\cdot Y_1(p)$$
$$\vdots$$
$$Y_n(p)=W_n(p)\cdot X_n(p)=W_n(p)\cdot Y_{n-1}(p)=Y(p)$$
$$=> Y(p)=W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot \ldots \cdot W_n(p)\cdot X(p) =>$$

$$\boxed{W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\prod_{i=1}^{n}W_i(p)}$$

– <u>передаточная функция последовательного соединения звеньев</u>

=> Передаточные функции $(W_i(p))$ и комплексные коэффициенты усиления $(W_i(j\omega))$ перемножаются.

Пример:

Последовательное соединение интегрирующего и инерционного звеньев:

$W_1(p)=\dfrac{K}{1+pT}$; $\quad W_2(p)=\dfrac{1}{p}$ $\quad => W(p)=W_1(p)\cdot W_2(p)=\dfrac{K}{p(1+pT)}$ – инерционно-интегрирующее звено.

Последовательное соединение двух инерционных (апериодических) звеньев:

$W_1(p)=\dfrac{K_1}{1+pT_1}$ и $W_2(p)=\dfrac{K_2}{1+pT_2}$ $=> W(p)=\dfrac{K_1\cdot K_2}{(1+pT_1)(1+pT_2)}=\dfrac{K}{(1+pT_1)(1+pT_2)}$

(К данному примеру мы вернемся в главе III).

При последовательном соединении звеньев модули комплексных коэффициентов усиления отдельных звеньев перемножаются, а аргументы складываются.
ЛАЧХ и ЛФЧХ отдельных звеньев складываются.

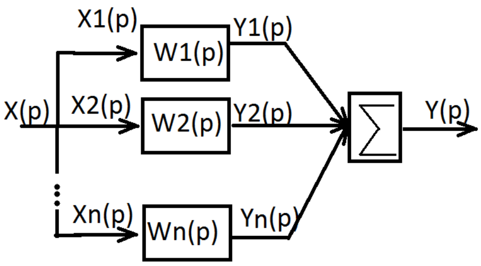
Если звенья в последовательном соединении являются минимально-фазовыми, то полученное (-ая) звено (система) тоже будет минимально-фазовым (-ой) (т.к. произведение сомножителей, не содержащих правых нулей и полюсов, также не содержит правых нулей и полюсов).

Аналогично и со свойством устойчивости: из устойчивости отдельных звеньев => устойчивость последовательного соединения звеньев.

Если хотя бы одно звено в последовательном соединении является неминимально-фазовым (или неустойчивым), то вся система будет неминимально-фазовой (или неустойчивой).

Переходная и весовая функции при последовательном соединении звеньев находятся по передаточной функции соединения – $W(p)$ – и не могут быть получены простым суммированием характеристик отдельных звеньев.

2). Параллельное соединение – такое соединение, при котором входная величина всех звеньев одна и та же, а выходные величины складываются:



$$Y(p)=X(p)\cdot W_1(p)+\ldots+X(p)\cdot W_n(p)=X(p)\cdot\sum_{i=1}^{n}W_i(p) =>$$

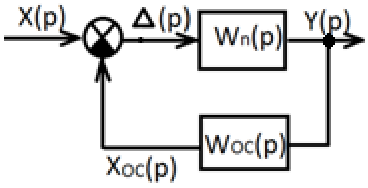
$$\boxed{W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\sum_{i=1}^{n}W_i(p)}$$ – передаточная функция параллельного соединения звеньев

=> При параллельном соединении звеньев передаточные, переходные и весовые функции складываются.

Если звенья с $W_i(p)$ устойчивы, то их параллельное соединение дает устойчивое звено (нет правых полюсов) (т.к. знаменатель $W(p)$ имеет те же корни, что и корни слагаемых $W_i(p)$).

Параллельное соединение минимально-фазовых звеньев может дать неминимально-фазовое звено и наоборот.

3). Соединение звеньев в цепь обратной связи



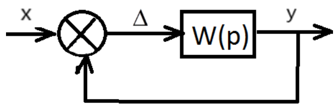
(*)

Прямая цепь – это совокупность звеньев, заключенных между выходом сумматора и выходом соединения. $W_П(p)$ – передаточная функция звена прямой цепи.

Обратная цепь (связь) – это совокупность звеньев, заключенных между выходом соединения и входом сумматора. $W_{OC}(p)$ – передаточная функция звена обратной связи.

Если $W_{OC}(p)=1$, то обратная связь изображается так:

(«единичная обратная связь»)



Если сигнал обратной связи x_{oc} вычитается (подходит на сумматор со знаком «-»), то обратная связь называется отрицательной, если складывается, то положительной.

В ТАУ большей частью рассматриваются системы с ООС.

Если цепь обратной связи представляет собой пропорциональное звено ($W_{OC}(p)=K$), то обратная связь называется жесткой.

Если цепь обратной связи представляет собой дифференцирующее звено (т.е. $W_{OC}(p)=pT$ (идеальное диф. звено) или $W_{OC}(p)=\dfrac{pT_1}{1+pT}$ (реальное диф. звено)), то ОС называется гибкой.

Найдем передаточную функцию соединения звеньев в цепь обратной связи:

$$W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)} \quad -?$$

Составим по структурной схеме (*) уравнения, описывающие входящие в ее состав элементы:

$$\begin{cases} Y(p)=\Delta(p)\cdot W_П(p) & (1) \\ X_{OC}(p)=W_{OC}(p)\cdot Y(p) & (2) \\ X(p)-X_{OC}(p)=\Delta(p) & (3) \end{cases}$$

(Первое и второе уравнения берутся их определения соответствующей передаточной функции: $W_П(p)\overset{def}{=}\dfrac{X_{вых}}{X_{вх}}=\dfrac{Y(p)}{\Delta(p)} \quad \Rightarrow \quad Y(p)=\Delta(p)W_П(p)$

(3) – уравнение замыкания (или уравнение сумматора))

$(2)\to(3)\to(1):\qquad Y(p)=X(p)\cdot W_{П}(p)-Y(p)\cdot W_{П}(p)\cdot W_{OC}(p)$ =>

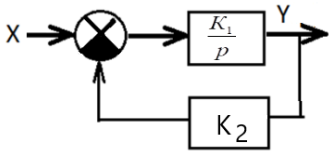
=> $\boxed{W(p)=\dfrac{Y(p)}{X(p)}=\dfrac{W_{П}(p)}{1+W_{П}(p)\cdot W_{OC}(p)}}$ (**)

– <u>передаточная функция соединения звеньев в цепь обратной связи</u> (для *отрицательной* ОС)

Для *положительной* ОС (когда $\Delta = X + X_{OC}$): $\boxed{W(p)=\dfrac{W_{П}(p)}{1-W_{П}(p)\cdot W_{OC}(p)}}$

<u>Устойчивые звенья</u> при соединении в цепь ОС <u>могут образовать неустойчивую систему</u> и наоборот.

Пример: интегрирующее звено, охваченное жесткой обратной связью (ЖОС):



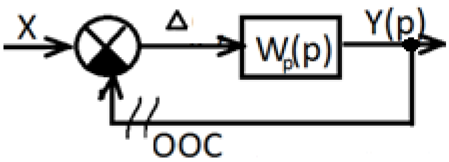
$$W_{П}(p)=\frac{K_1}{p};\ W_{OC}(p)=K_2\ => W(p)=\frac{\frac{K_1}{p}}{1+\frac{K_1K_2}{p}}=\frac{K_1}{p+K_1K_2}=\frac{K}{pT+1},$$

где $K=\dfrac{1}{K_2}$, $T=\dfrac{1}{K_1K_2}$

Т.о., интегрирующее звено, охваченное ЖОС, эквивалентно инерционному звену.

Некоторые соотношения для разомкнутых и замкнутых систем

Рассмотрим систему со структурной схемой



(***)

при размыкании обратной связи (для простоты взяли случай единичной обратной связи):

$W_{раз.}(p)=\dfrac{Y(p)}{X(p)}\Big|_{\text{без ОС}}$ – <u>передаточная функция разомкнутой системы</u> (кратко можно обозначать $W_p(p)$)

Пусть передаточная функция разомкнутой системы является дробно-рациональной, т.е.

$$\boxed{W_{раз.}(p)=\frac{B(p)}{A(p)}},$$

где $B(p)=b_0p^m+b_1p^{m-1}+\ldots+b_m$ и $A(p)=a_0p^n+a_1p^{n-1}+\ldots+a_n$ – полиномы.

Тогда $\boxed{W_{замк.}(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}\Big|_{с\ ОС}\overset{согласно\ (**)}{=}\frac{W_p(p)}{1+W_p(p)}=\frac{B(p)}{B(p)+A(p)}=\frac{B(p)}{D(p)}}$ – <u>передаточная функция **замкнутой** системы</u>

$A(p)=0$ – <u>характеристическое уравнение разомкнутой системы</u> ($A(p)$ – характеристический полином разомкнутой системы)

$D(p)=0$ – <u>ХУ замкнутой системы</u> ($D(p)=B(p)+A(p)$ – характеристический полином замкнутой системы)

$\boxed{\Delta(t)=x(t)-y(t)}$ – **ошибка** (степень несоответствия y (выходная величина) и x (управляющее (задающее) воздействие))

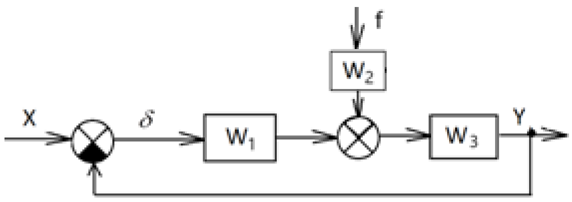
<u>Передаточная функция ошибки</u> по управляющему воздействию:

$$\boxed{W_\delta(p)=\frac{\Delta(p)}{X(p)}\overset{по\ формуле\ (**)}{=}\frac{1}{1+W_p(p)}}$$

К виду (***) можно привести любую линейную систему (только в общем случае в цепи ОС имеется звено с $W_{OC}(p)\neq 1$). Но не любая система приводится к такому виду, если переменные x и y имеют смысловую нагрузку управляющего воздействия и регулируемой величины.

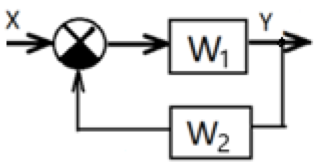
Передаточная функция разомкнутой системы определяется как произведение передаточных функций всех звеньев, входящих *в замкнутый* контур:

<u>Пример а).</u>



$$W_p(p)=W_1(p)\cdot W_3(p)$$

<u>Пример б).</u>



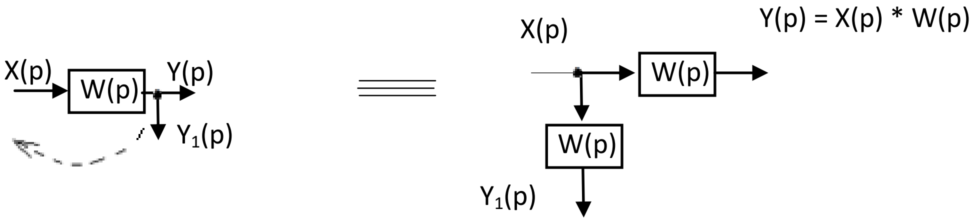
$$W_p(p)=W_1(p)\cdot W_2(p)$$

(то, что ОС отрицательная, на вид $W_p(p)$ не влияет, т.е. никакого минуса не будет!)

4.2 Правила преобразования структурных схем (правила структурных преобразований).

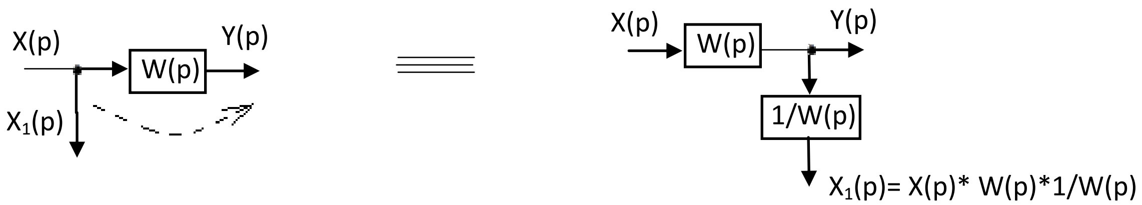
<u>Правило 1.</u> <u>Перенос узла</u>

а) При переносе узла через звено с передаточной функцией $W(p)$ с выхода звена на его вход в цепь ответвления добавляется звено с передаточной функцией, равной $W(p)$:



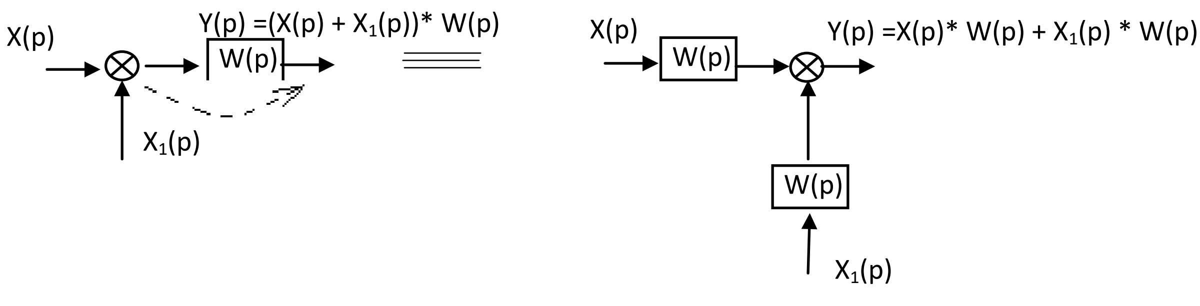
Y(p) = Y_1(p) = X(p) * W(p) Y_1(p) = X(p) * W(p) *(ничего не изменилось)*

б) При переносе узла через звено с передаточной функцией $W(p)$ со входа звена на его выход в цепь ответвления добавляется звено с передаточной функцией, обратной $W(p)$:

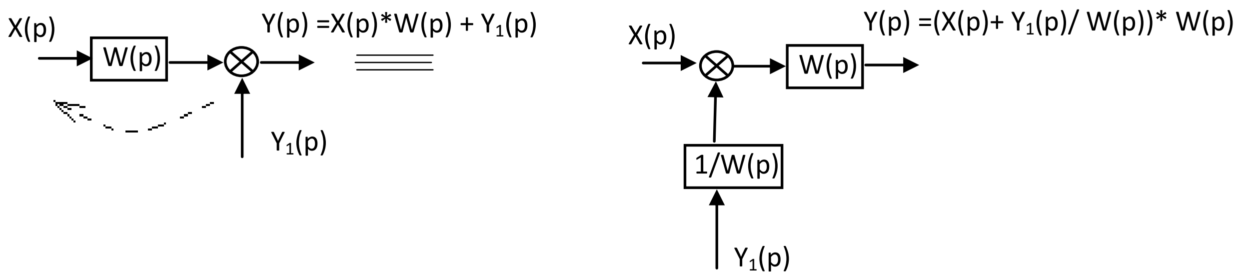


<u>Правило 2.</u> <u>Перенос сумматора</u>

а) При переносе сумматора через звено с передаточной функцией $W(p)$ со входа звена на его выход переносимое воздействие умножается на звено с той же самой передаточной функцией $W(p)$:



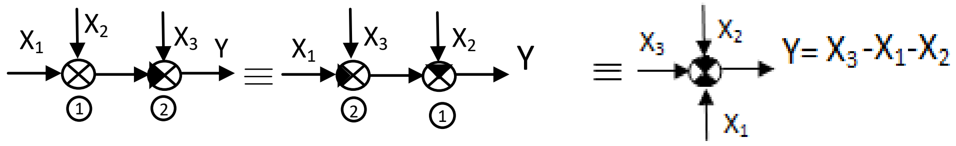
б) При переносе сумматора через звено с передаточной функцией W(p) с выхода звена на его вход переносимое воздействие умножается на звено с передаточной функцией, обратной исходной:



Правило 3. Перестановка сумматоров

Сумматоры можно переставлять местами и объединять.

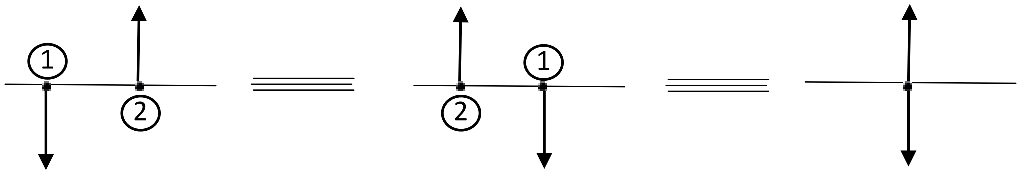
Например:



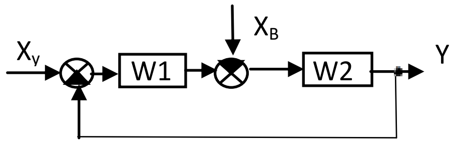
$Y=-(X_1+X_2)+X_3$ $\qquad$ $Y=-X_1+X_3-X_2$

Правило 4. Перестановка узлов

Узлы можно переставлять местами и объединять.



Любая непрерывная ЛСАУ может быть представлена в виде одноконтурной структурной схемы:



где $X_у$ – управляющее воздействие

Y – регулируемая величина

$X_в$ – возмущающее воздействие

Передаточная функция [замкнутой] системы по управляющему воздействию:

$$W_{упр}(p) = \frac{Y(P)}{X_y(p)}\bigg|_{X_B=0} = \frac{W_1(p)*W_2(p)}{1+W_1(p)*W_2(p)} = \frac{W_p(p)}{1+W_p(p)},$$

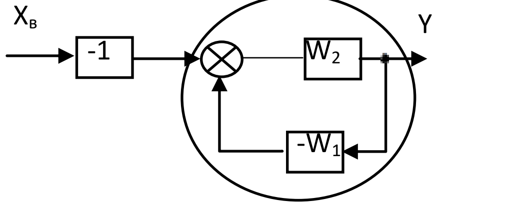
где $W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы

Передаточная функция системы по возмущающему воздействию:

$$W_{воз}(p) = \frac{Y(P)}{X_в(p)}\bigg|_{X_y=0} = -\frac{W_2(p)}{1+W_1(p)*W_2(p)} = -\frac{W_2(p)}{1+W_p(p)}$$

$W = \dfrac{W_2}{1+W_1W_2}$

Для нахождения п.ф. системы по возмущающему воздействию структурную схему перерисовывают:



Если структурная схема САУ является многоконтурной, то передаточная функция вычисляется после преобразования схемы к одноконтурной, используя правила структурных преобразований.

Пример 1:

По заданной системе дифференциальных уравнений составить структурную схему САУ и определить передаточную функцию системы, используя правила структурных преобразований.

Решение:

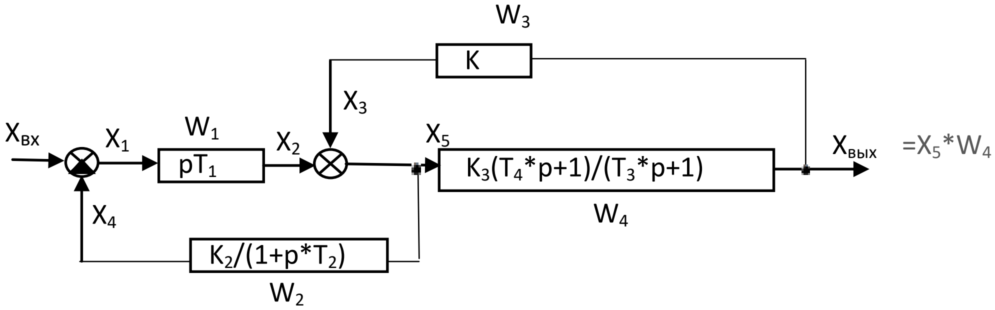
$$\begin{cases} x_1 = x_{\text{вх}} - x_4 \\ x_2 = T_1 \dfrac{dx_1}{dt} \\ x_3 = K x_{\text{вых}} \\ T_2 \dfrac{dx_4}{dt} + x_4 = K_2 x_5 \\ x_5 = x_2 + x_3 \\ T_3 \dfrac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = K_3 \left(T_4 \dfrac{dx_5}{dt} + x_5 \right) \end{cases}$$

Перейдем к изображениям по Лапласу при нулевых предначальных условиях,

$$\boxed{f^{(k)}(t) \rightarrow p^k \cdot F(p)}$$

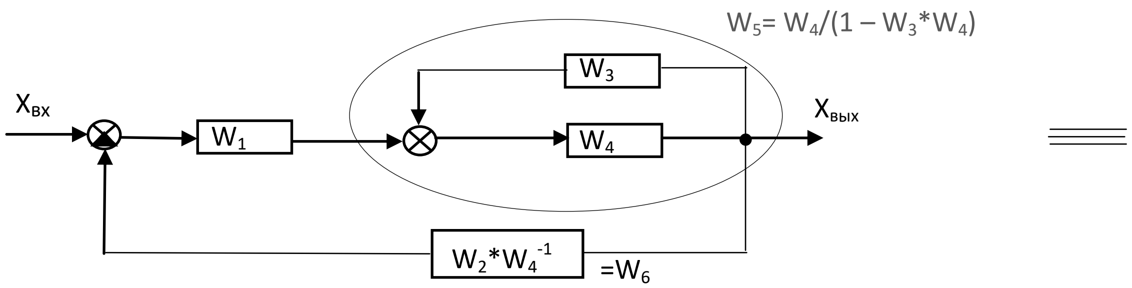
$$\begin{cases} X_1(p) = X_{\text{вх}}(p) - X_4(p) \\ X_2(p) = T_1 * p * X_1(p) \\ X_3(p) = K * X_{\text{вых}}(p) \\ (T_2 * p + 1) * X_4(p) = K_2 * X_5(p) \\ X_5(p) = X_2(p) + X_3(p) \\ (T_3 * p + 1) * X_{\text{вых}}(p) = K_3 * (T_4 * p + 1) * X_5 \end{cases}$$

Полученной системе уравнений соответствует структурная схема:



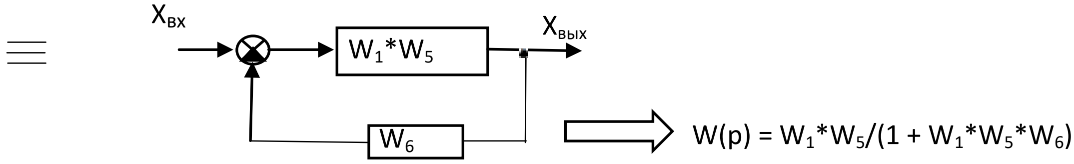
Данная структурная схема – двухконтурная.

Обозначим для удобства передаточные функции динамических звеньев как W_1, W_2, W_3 и W_4. Воспользовавшись правилом 1 структурных преобразований, перенесем левый узел через звено с передаточной функцией $W_4(p)$ со входа данного звена на его выход (при этом в цепь ответвления добавляется звено с передаточной функцией, обратной W_4):



Вычислим передаточную функцию соединения звеньев в цепь обратной связи и обозначим ее как W_5; последовательно соединенные звенья с передаточными функциями W_2 и $1/W_4$ эквивалентны звену с передаточной функцией W_2/W_4 - обозначим ее как W_6.

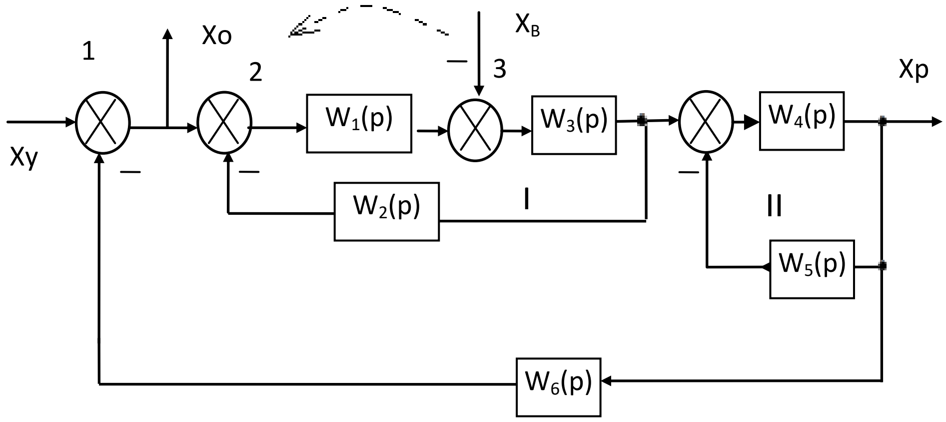
Далее, с учетом того, что звенья с передаточными функциями W_1 и W_5 соединены последовательно, будем иметь:



Ответ: передаточная функция системы равна $W(p) = \dfrac{W_1(p)W_5(p)}{1+W_1(p)W_5(p)W_6(p)}$.

Пример 2:

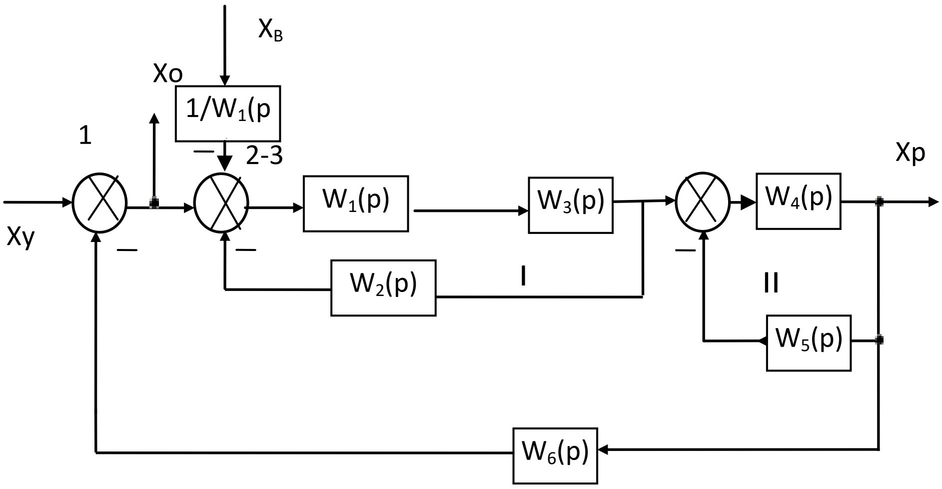
Для заданной структурной схемы САУ найти передаточные функции замкнутой системы по управлению $\left(\dfrac{X_p(p)}{X_y(p)}\right)$ и возмущению $\left(\dfrac{X_p(p)}{X_B(p)}\right)$ и передаточные функции ошибки по управлению $\left(\dfrac{X_o(p)}{X_y(p)}\right)$ и возмущению $\left(\dfrac{X_o(p)}{X_B(p)}\right)$, используя правила структурных преобразований.



Решение:

Обозначим сумматоры и контуры обратной связи, которые мы будем использовать при структурных преобразованиях, на исходной структурной схеме арабскими и римскими цифрами соответственно.

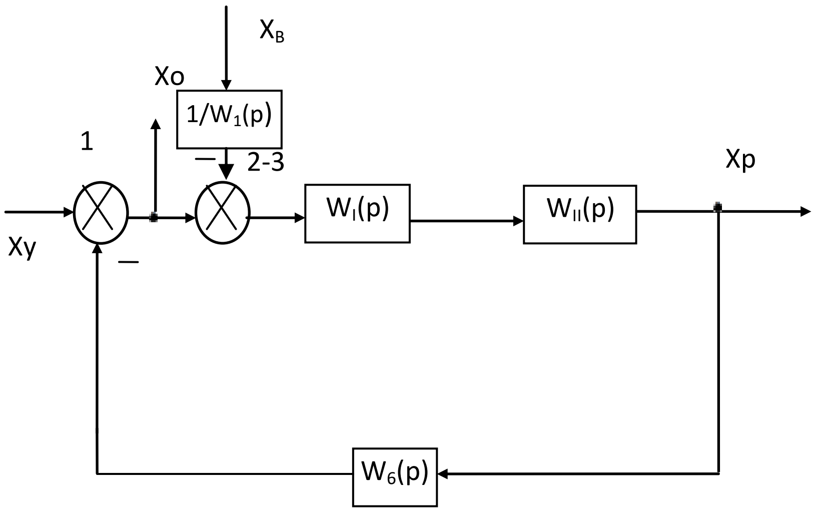
Перенесем сумматор 3 через динамическое звено с передаточной функцией $W_1(p)$ с выхода данного звена на его вход (при этом переносимое воздействие – сигнал возмущения X_B – пройдет через звено с передаточной функцией, обратной $W_1(p)$). Объединив два последовательно стоящие сумматора 2 и 3, получим:



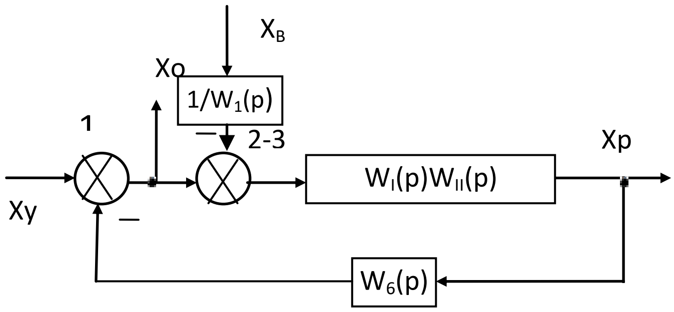
Заменим последовательно стоящие звенья с передаточными функциями $W_1(p)$ и $W_3(p)$ эквивалентным звеном с передаточной функцией $W_1(p)W_3(p)$, контуры **I** и **II (**соединения звеньев в цепь ОС) – эквивалентными звеньями с передаточными функциями:

$$W_I(p) = \frac{W_1(p)W_3(p)}{1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)} \text{ и } W_{II}(p) = \frac{W_4(p)}{1+W_4(p)W_5(p)}.$$

Изобразим полученную структурную схему:



Объединив последовательно соединенные звенья с передаточными функциями $W_I(p)$ и $W_{II}(p)$, получим эквивалентное звено с передаточной функцией $W_I(p)W_{II}(p)$ и изобразим структурную схему в виде:



Для полученной структурной схемы можно записать требуемые передаточные функции:

- передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию:

$$W_{замк\ у}(p)=\left.\frac{X_р}{X_у}\right|_{X_в=0}=\frac{W_I(p)W_{II}(p)}{1+W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}=\frac{\dfrac{W_1(p)W_3(p)}{1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)}\cdot\dfrac{W_4(p)}{1+W_4(p)W_5(p)}}{1+\dfrac{W_1(p)W_3(p)}{1+W_1(p)W_2(p)W_3(p)}\cdot\dfrac{W_4(p)}{1+W_4(p)W_5(p)}\cdot W_6(p)}=\ldots$$

- передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$W_{замк\ в}(p)=\left.\frac{X_р}{X_в}\right|_{X_у=0}=\frac{W_I(p)W_{II}(p)}{1+W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}\cdot\left(-\frac{1}{W_1(p)}\right)=\ldots$$

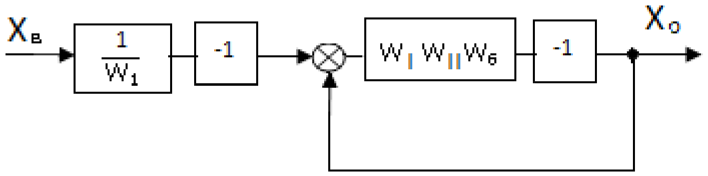
- передаточная функция ошибки по управляющему воздействию:

$$W_{о\ у}(p)=\left.\frac{X_о}{X_у}\right|_{X_в=0}=\frac{1}{1+W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}=\ldots$$

(выходом является ошибка, поэтому передаточная функция прямой цепи =1)

- передаточная функция ошибки по возмущающему воздействию:

Для ее нахождения перерисуем структурную схему:



$$W_{о\ в}(p)=\left.\frac{X_о}{X_в}\right|_{X_у=0}=-\frac{1}{W_1(p)}\cdot\frac{-W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}{1-(-W_I(p)W_{II}(p)W_6(p))}=\frac{1}{W_1(p)}\cdot\frac{W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}{1+W_I(p)W_{II}(p)W_6(p)}=\ldots$$