

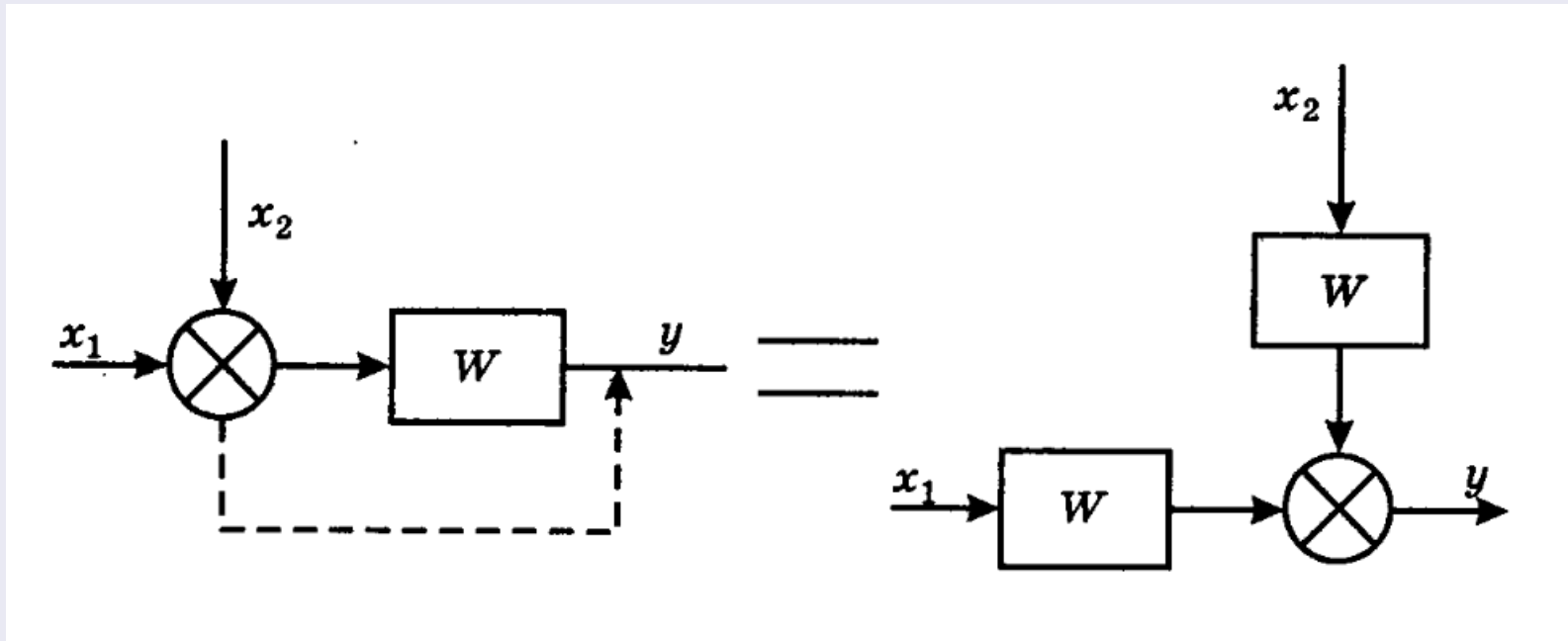
Преобразования структурных схем,
системы автоматического управления и регулирования

- 1 Правила преобразования структурных схем
- 2 Системы автоматического управления и регулирования

Правила преобразования структурных схем

Нередко для нахождения передаточной функции всей системы приходится выполнять преобразования структурных схем. Рассмотрим основные правила таких преобразований.

Правило переноса сумматора через звено по направлению передачи воздействия

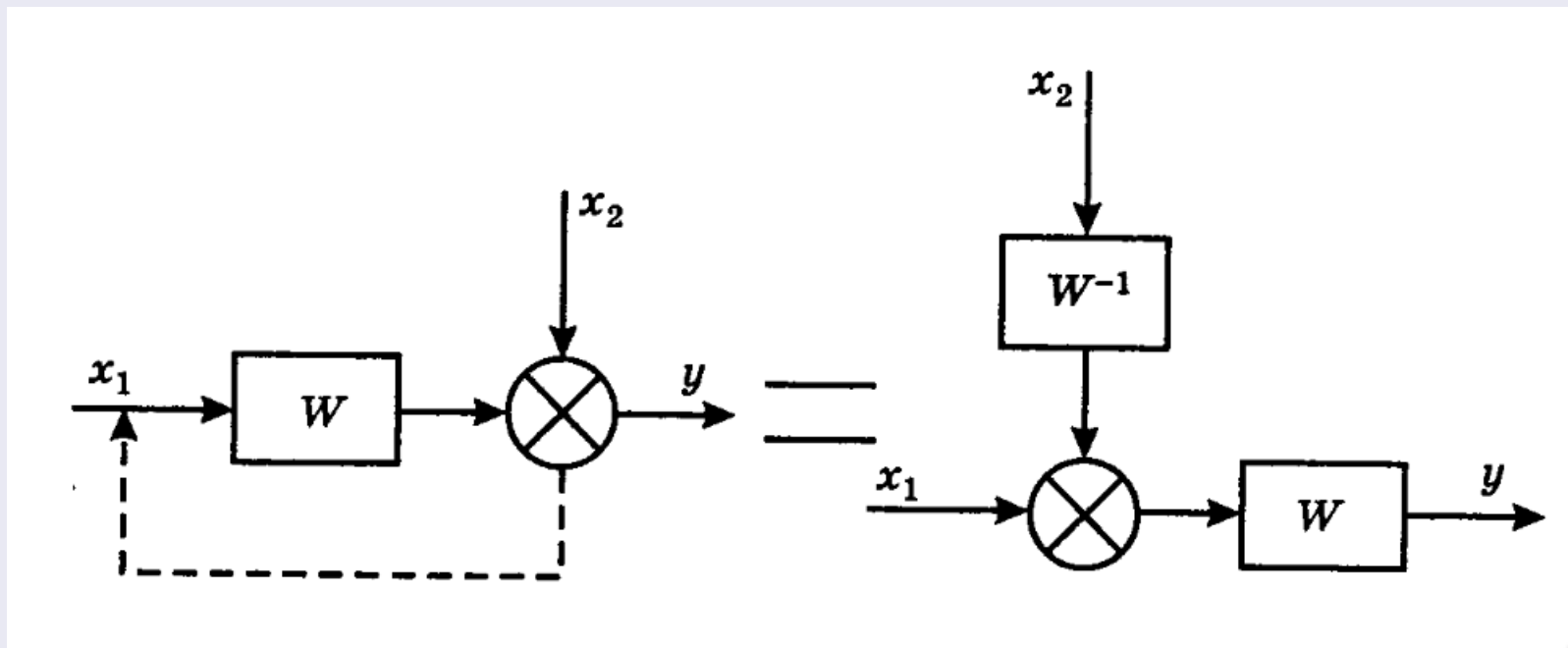


При таком переносе в подходящие к сумматору ветви включаются звенья с такими же передаточными функциями:

$$y = W(x_1 + x_2) = Wx_1 + Wx_2$$

Правила преобразования структурных схем

Правило переноса сумматора через звено против направления передачи воздействия

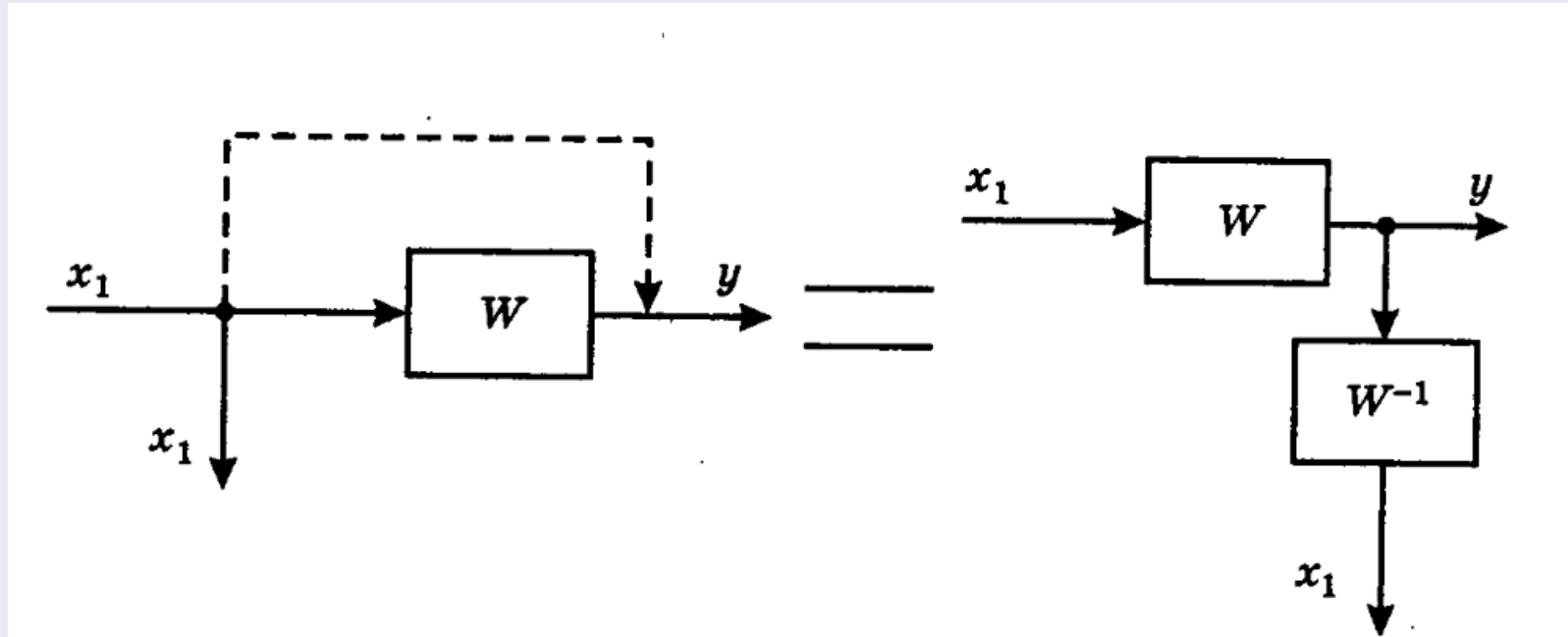


При таком преобразовании в подходящие к сумматору ветви включаются звенья с обратными передаточными функциями:

$$y = Wx_1 + x_2 = (x_1 + W^{-1}x_2)W$$

Правила преобразования структурных схем

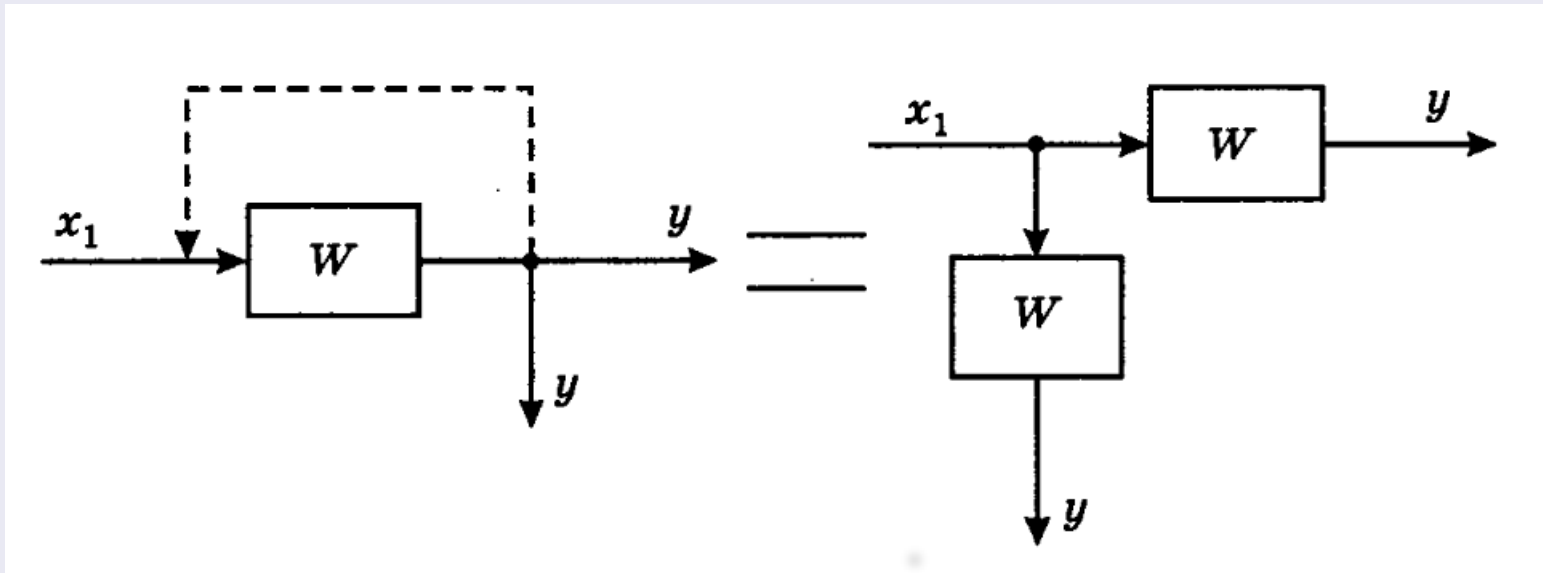
Правило переноса узла разветвления через звено по направлению передачи воздействия



В данном случае в отходящие от узла ветви включаются звенья с обратными передаточными функциями.

Правила преобразования структурных схем

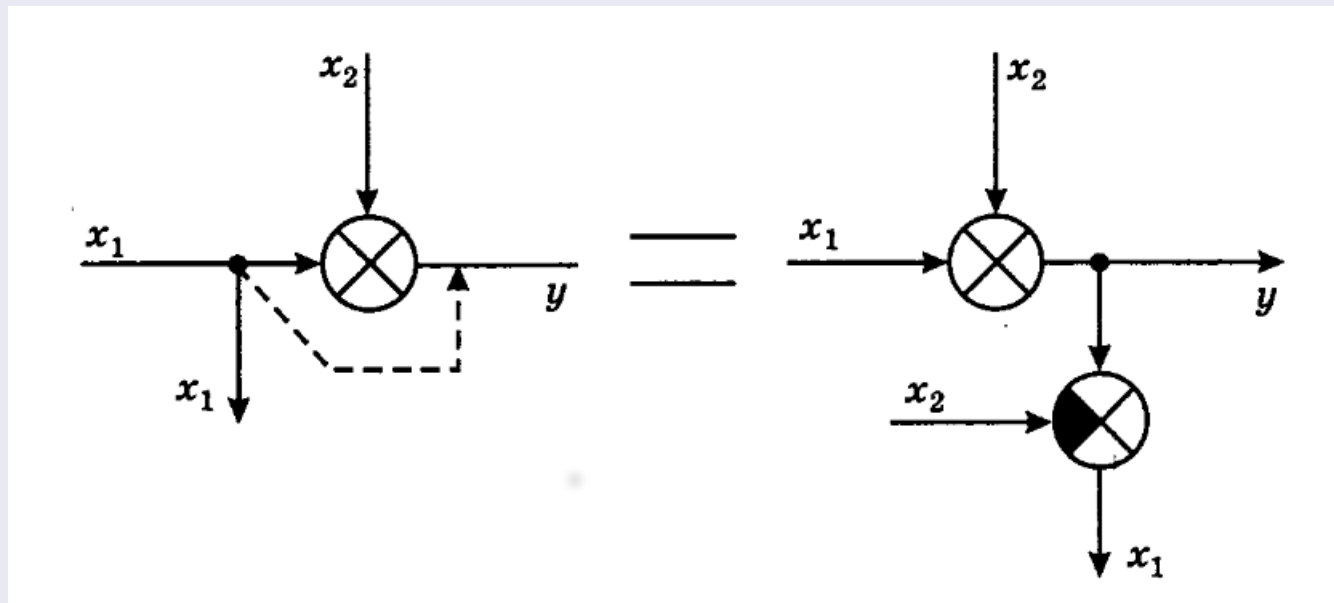
Правило переноса узла разветвления через звено против направления передачи воздействия



При этом в каждую из отходящих от узла ветвей включаются звенья с такими же передаточными функциями.

Правила преобразования структурных схем

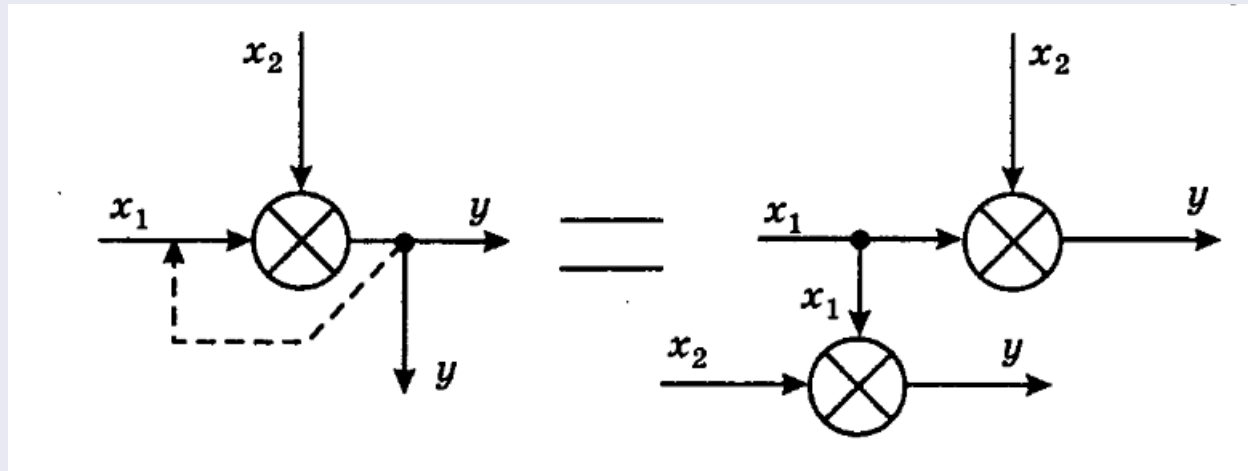
Правило переноса узла разветвления через сумматор по направлению передачи воздействия



При этом в отходящие от узла ветви включаются сумматоры с противоположным знаком суммирования ($-x_2$ вместо $+x_2$).

Правила преобразования структурных схем

Правило переноса узла разветвления через сумматор против направления передачи воздействия

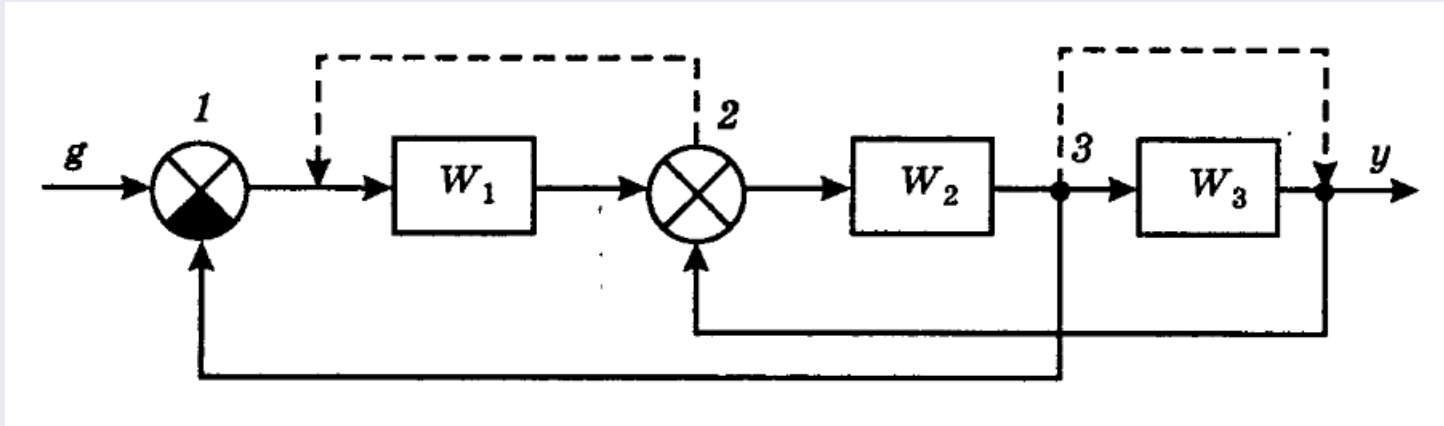


При этом в каждую из отходящих ветвей включаются такие же сумматоры.

Правило чередования узлов: рядом расположенные узлы разветвления можно менять местами между собой или объединять в один узел.

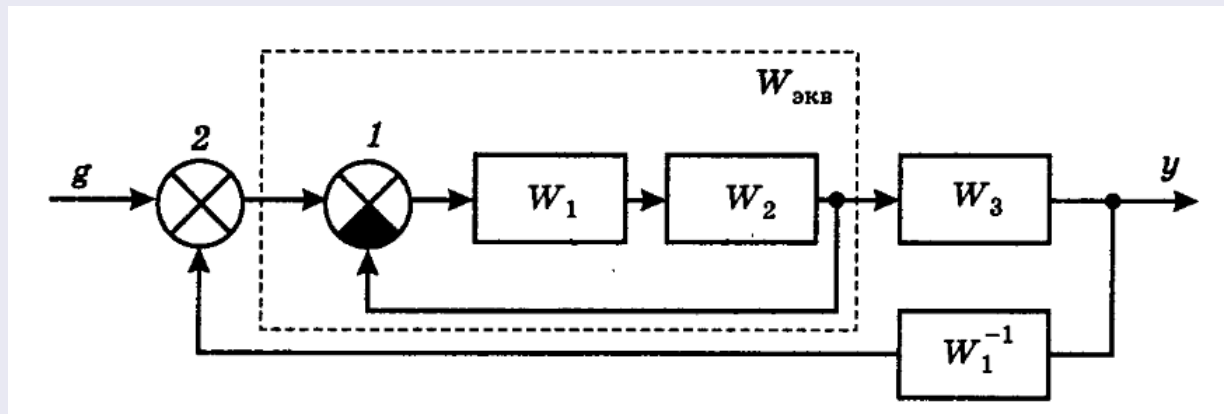
Правило чередования сумматоров: рядом расположенные сумматоры можно менять местами между собой или объединять в один сумматор.

Пример преобразования структурных схем



В данной схеме можно выполнить одно из двух эквивалентных преобразований: перенести сумматор (2) против направления воздействия, перенести узел (3) по направлению воздействия.

При переносе сумматора получим следующую эквивалентную схему:



Кроме переноса сумматора, также было выполнено изменение чередования сумматоров.

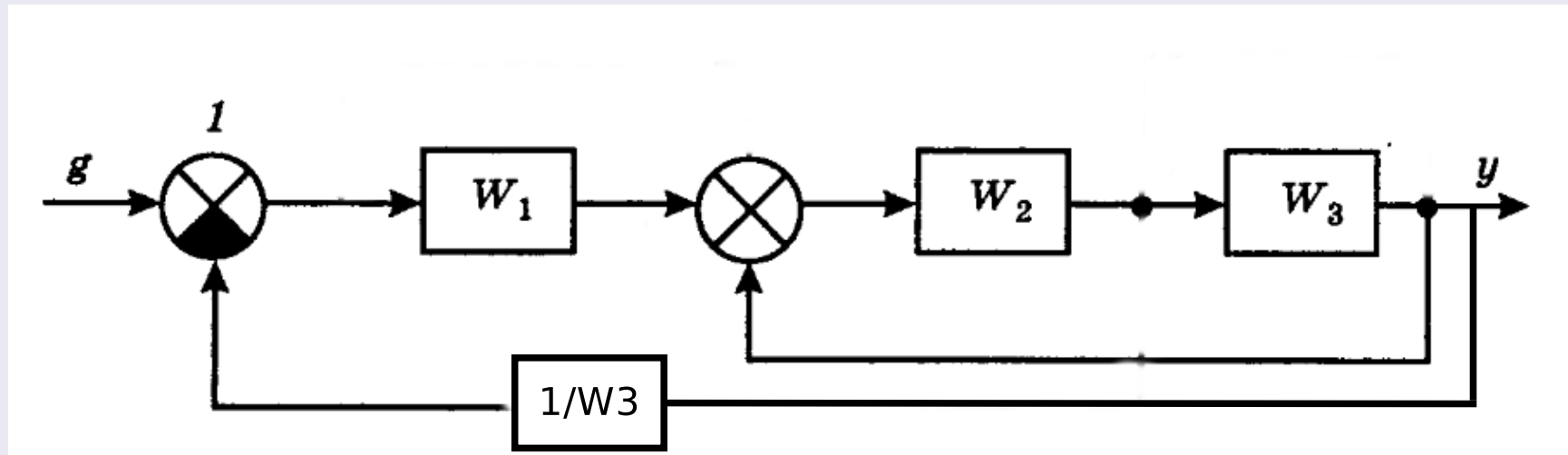
Пример преобразования структурных схем

Окончательно передаточная функция всей системы, которая связывает вход и выход, равна:

$$W_{\text{экв}} = \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2}$$
$$W = \frac{W_{\text{экв}} \cdot W_3}{1 - \frac{W_{\text{экв}} \cdot W_3}{W_1}} = \frac{\frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2} \cdot W_3}{1 - \frac{W_1 W_2 W_3}{W_1(1 + W_1 W_2)}} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1 + W_1 W_2 - W_2 W_3}$$

Пример преобразования структурных схем

Если выбрать перенос узла по направлению передачи воздействия, то получим следующую схему:

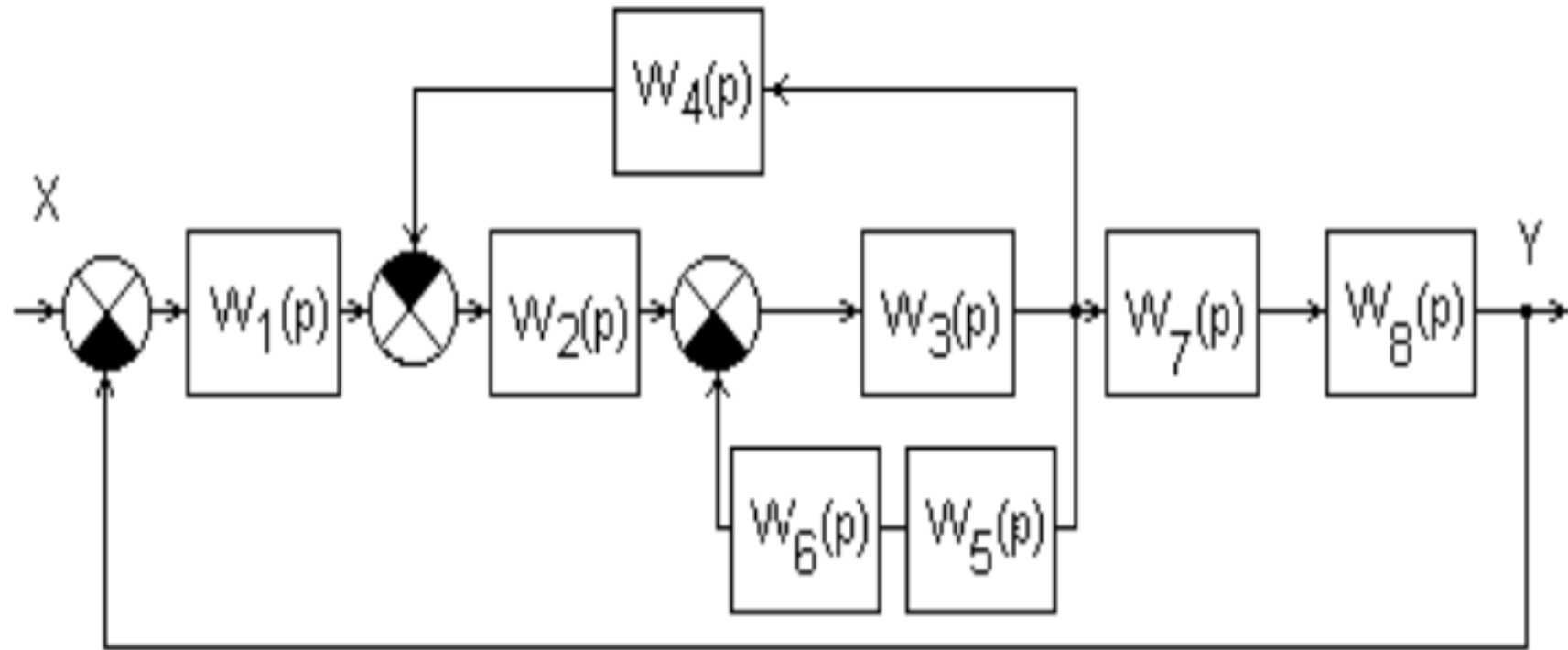


Тогда передаточная функция всей системы может быть найдена следующим образом:

$$W = \frac{\frac{W_2 W_3}{1 - W_2 W_3} \cdot W_1}{1 + \frac{W_1 W_2 W_3}{(1 - W_2 W_3) W_3}} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1 + W_1 W_2 - W_2 W_3}$$

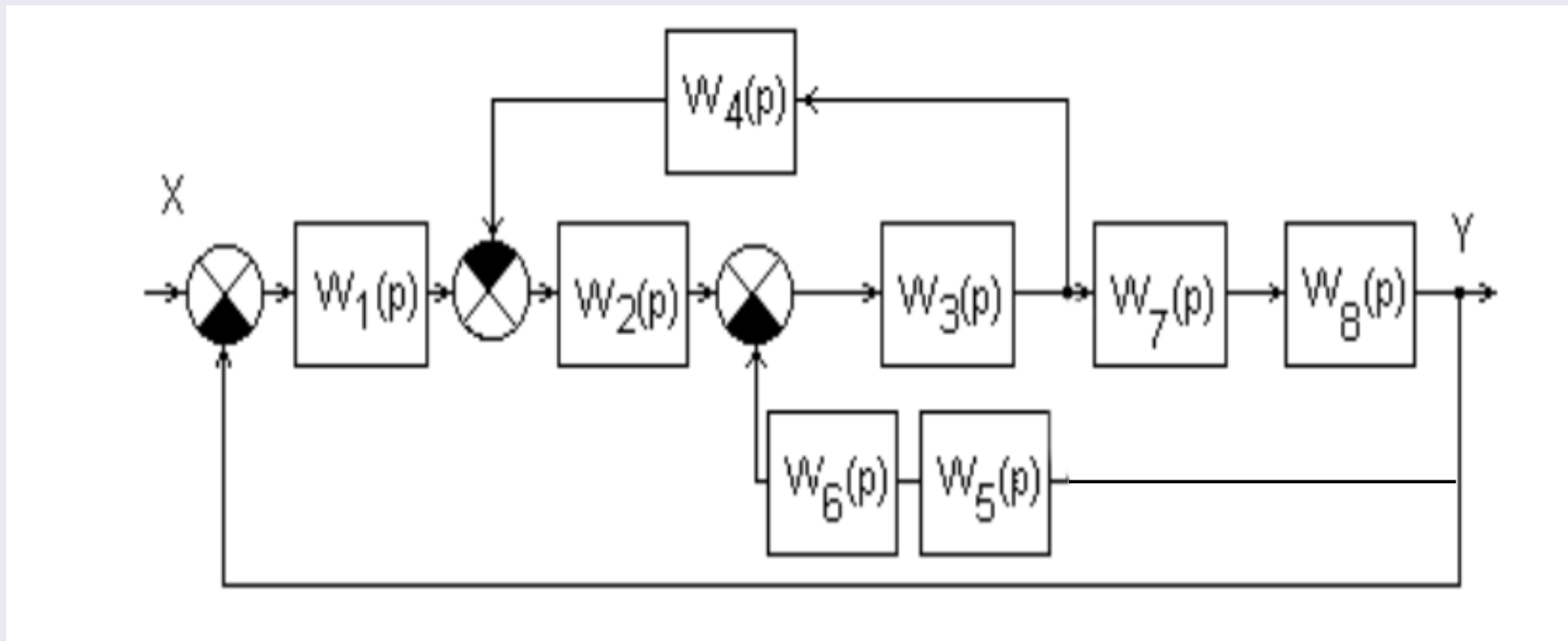
Задание 1

Упростить структурную схему путем ее преобразования:



Задание 2

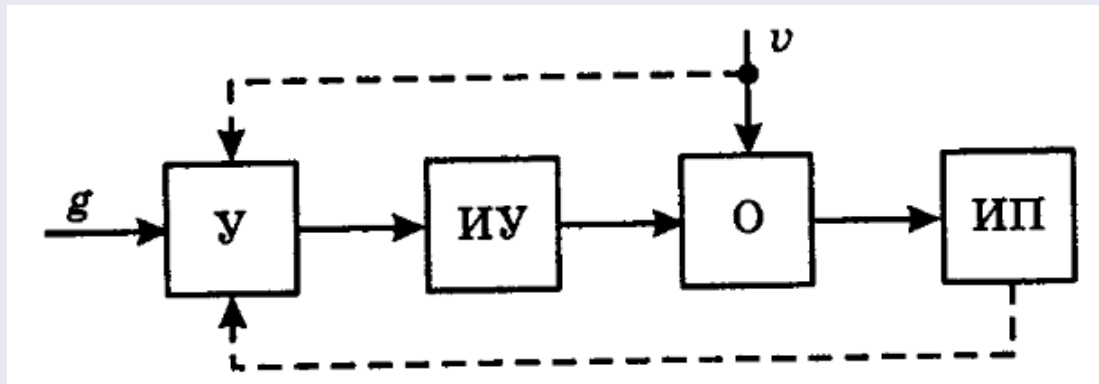
Упростить структурную схему путем ее преобразования:



Системы автоматического управления и регулирования

Системы автоматического управления (САУ) могут осуществлять некоторые операции управления без участия человека, которые, как правило, направлены на поддержание или улучшение работы объектов управления (ОУ).

Системы автоматического регулирования (САР) осуществляют поддержание регулируемой величины на заданном постоянном значении или изменение ее по заданному закону без непосредственного участия человека. Реализуется оно путем измерения регулируемой величины и (или) действующих на объект возмущений и использования измеренных сигналов для формирования регулирующего воздействия на объект регулирования. Автоматическое регулирование - это частный случай автоматического управления.



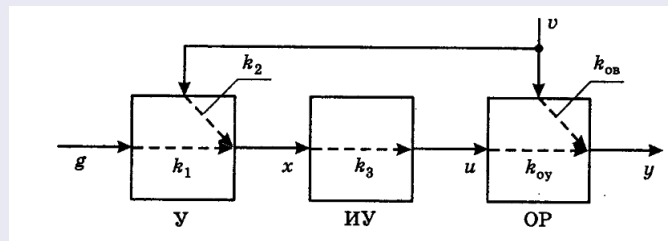
На рисунке g - задающее воздействие, v - возмущающее воздействие, $У$ - усилительно-преобразовательное устройство, ИУ - исполнительное устройство, $О$ - объект управления, ИП - измерительный преобразователь (датчик).

Принципы регулирования

Выделяют следующие основные принципы регулирования:

- Регулирование по внешним возмущающим воздействиям.
- Регулирование по отклонению регулируемой величины от заданного значения.
- Комбинированный, использующий два предыдущих в одной системе.

Функциональная схема принципа регулирования по внешним возмущающим воздействиям представлена на рисунке:



Объект регулирования (ОР):

$$y = k_{oy}u - k_{ов}v$$

Исполнительное устройство (ИУ):

$$u = k_3x$$

Усилительно-преобразовательное устройство (У):

$$x = k_1g + k_2v$$

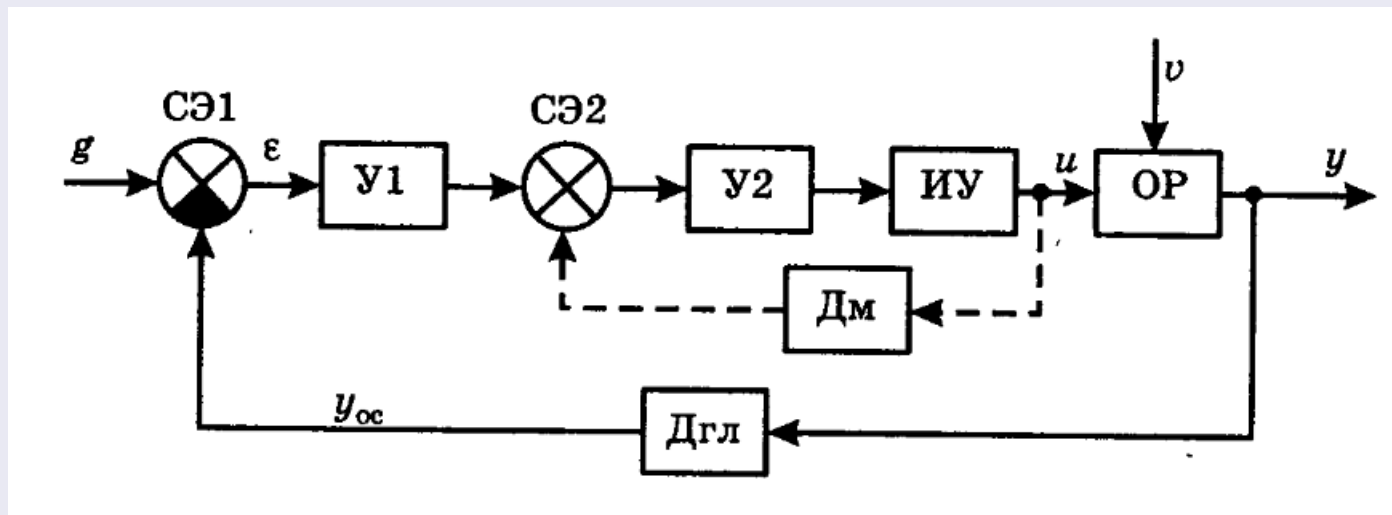
Окончательно получаем: $y = k_{oy}k_3(k_1g + k_2v) - k_{ов}v = k_1k_2k_{oy}g + (k_2k_3k_{oy} - k_{ов})v$

Принципы регулирования

При регулировании по возмущающему воздействию при $k_2 k_3 k_{oy} = k_{ов}$ удастся полностью исключить возмущающее воздействие. Достоинства такого принципа регулирования: высокое быстродействие, обеспечиваемое тем, что управляющее воздействие начинает изменяться сразу после изменения возмущения; устойчивость системы - способность системы возвращаться к исходному состоянию после снятия возмущения.

Недостаток данного принципа - способность системы компенсировать только контролируемое возмущение. Все остальные возмущения беспрепятственно влияют на регулируемую величину.

На следующем рисунке приведена функциональная схема САР с принципом регулирования по отклонению.



Принципы регулирования

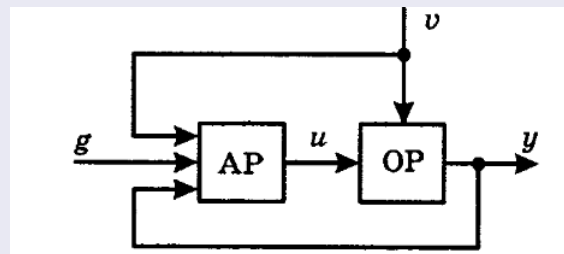
В систему входят две обратные связи: главная с датчиком $\Delta_{гд}$ и местная с датчиком $\Delta_{м}$. Наличие главной обратной связи обязательно. Она выполняет две основных функции: преобразует физическую величину y в другую величину $y_{ос}$; позволяет определить рассогласование $\epsilon = g - y_{ос}$ и вносить регулирующее воздействие.

Главная обратная связь должна быть жесткой, т.е. передавать как меняющиеся, так и постоянные во времени сигналы, при устойчивом объекте регулирования должна быть отрицательной. Местная ОС предназначена для придания системе устойчивости (стабилизация) или улучшения качества ее переходного процесса (коррекция). Местная ОС может быть положительной и отрицательной, жесткой и гибкой. В последнем случае она не проявляет себя в статическом режиме.

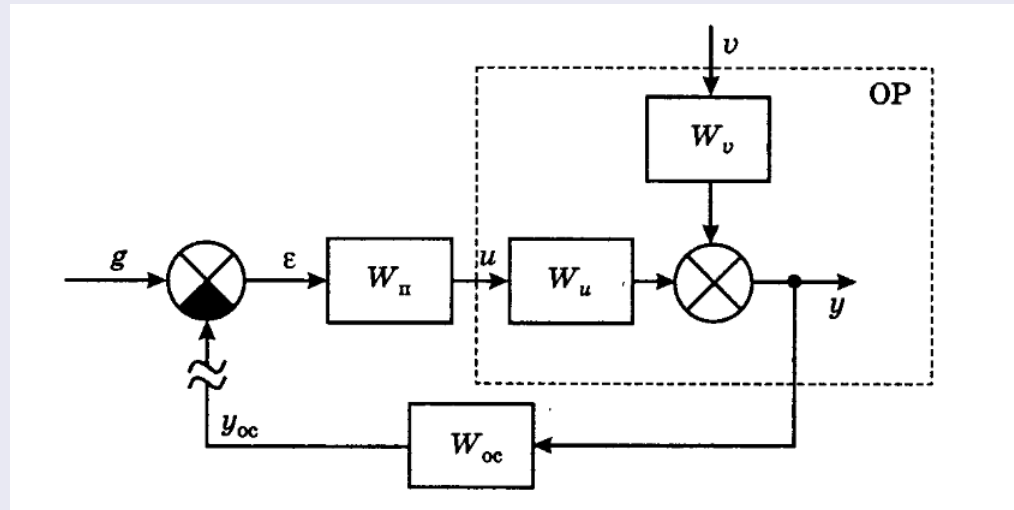
Достоинством такого принципа регулирования является его универсальность - любое возмущение устойчивой системой компенсируется, поскольку оно вызывает рассогласование ϵ и соответствующую реакцию автоматического регулятора.

Недостатками являются: сравнительно медленная реакция на возмущение; возможность нарушения устойчивости за счет наличия замкнутого контура.

На следующем рисунке показана схема комбинированного регулирования:



Передаточные функции при регулировании по отклонению



Основная передаточная функция связывает выходную величину y с задающим воздействием g :

$$W(s) = \frac{Y(s)}{G(s)} = \frac{W_{\pi}W_u}{1 + W_{\pi}W_uW_{oc}}$$

Передаточная функция по возмущению относительно регулируемой величины:

$$W_{\text{возм}} = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{W_v}{1 + W_{\pi}W_uW_{oc}}$$

Передаточная функция по задающему воздействию относительно рассогласования:

$$W_{\epsilon} = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{1}{1 + W_{\pi}W_uW_{oc}}$$

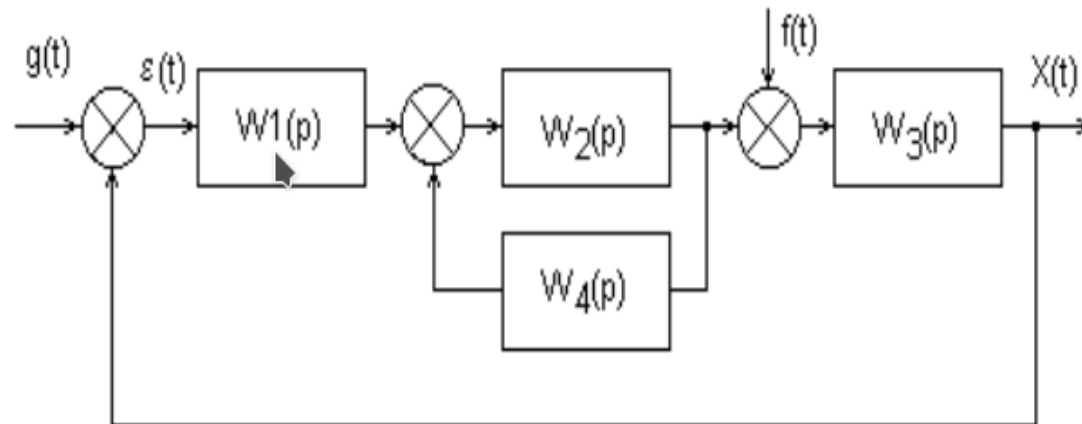
Передаточная функция по возмущению относительно рассогласования: $W_{v\epsilon} = \frac{E(s)}{V(s)}$

$$V(s)W_v + W_{\Pi}W_u E(s) = -\frac{E(s)}{W_{oc}}$$

$$W_{v\epsilon} = -\frac{W_v W_{oc}}{1 + W_{\Pi}W_u W_{oc}}$$

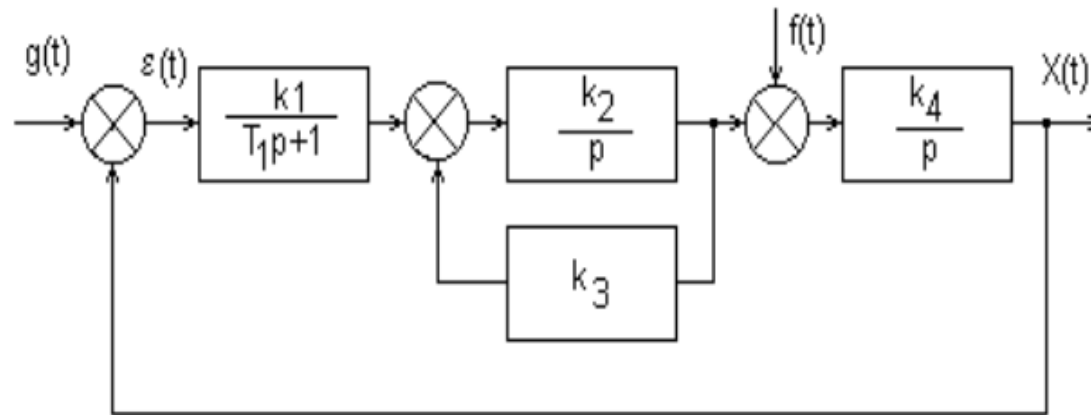
Задание 3

Определить W , $W_{\text{возм}}$, W_{ϵ} , $W_{v\epsilon}$ для следующей схемы:



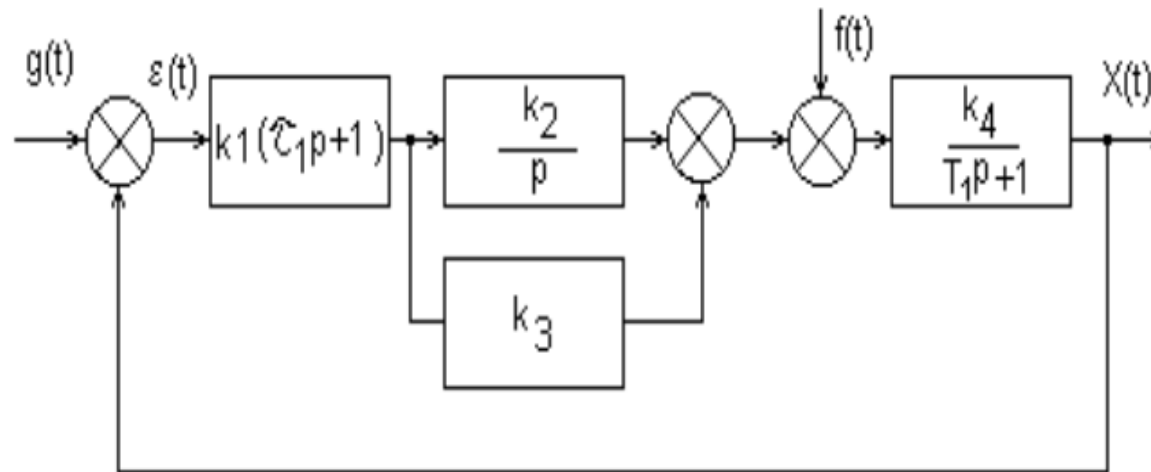
Задание 4

Определить W , $W_{\text{возм}}$, W_{ϵ} , $W_{v\epsilon}$ для следующей схемы:



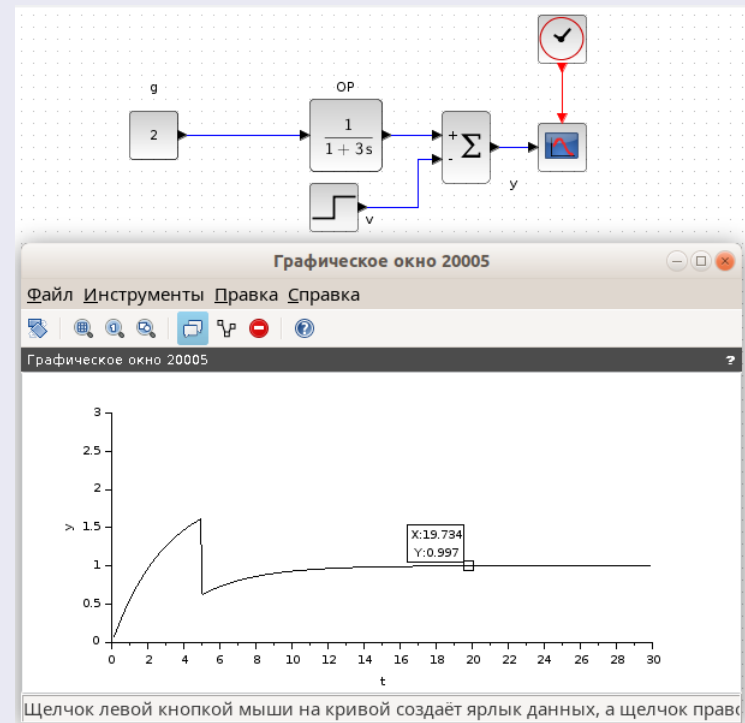
Задание 5

Определить W , $W_{\text{возм}}$, W_{ϵ} , $W_{v\epsilon}$ для следующей схемы:



Задача регулирования

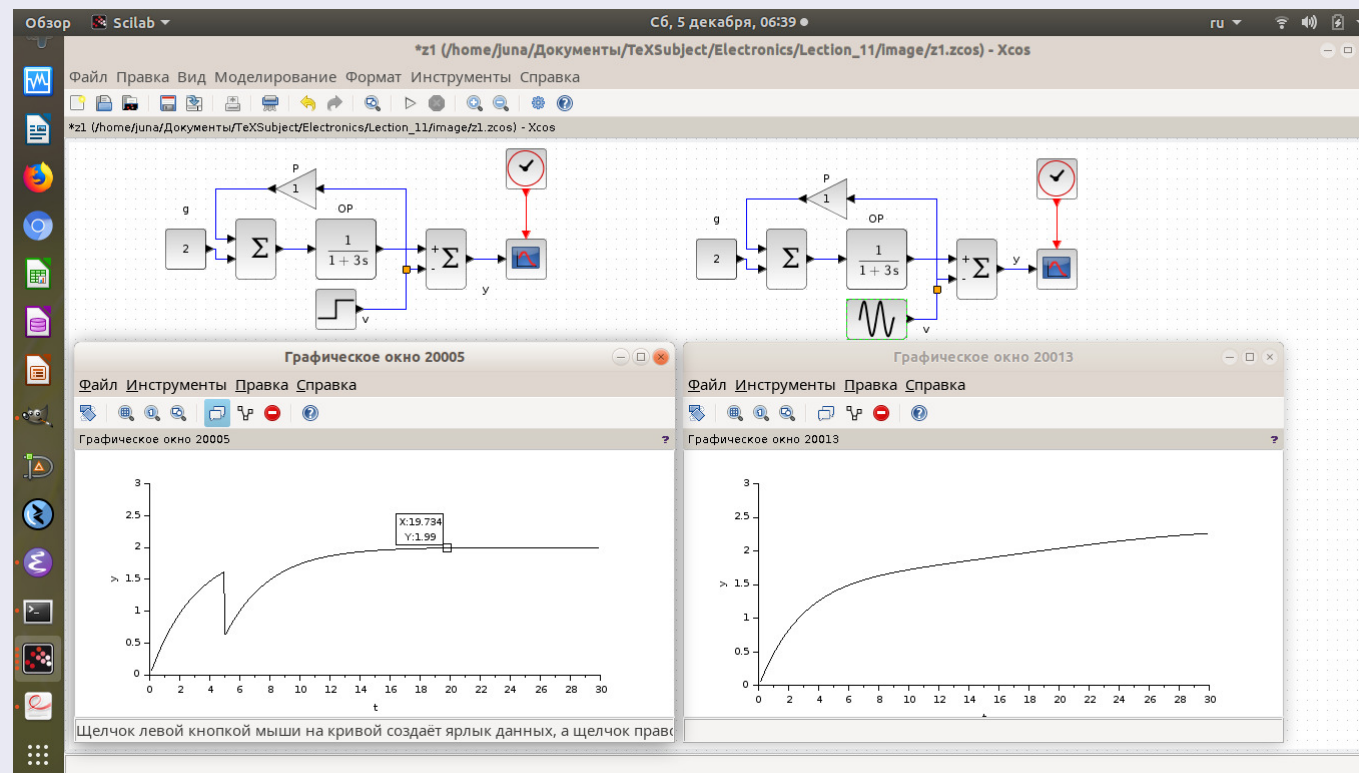
Цель систем автоматического регулирования парировать возмущающие воздействия на объект регулирования. Например, объект регулирования описывается некоторой передаточной функцией апериодического звена (двигатель постоянного тока). Нам необходимо обеспечить на выходе уровень сигнала 2 условные единицы (например, заданную угловую скорость). Мы устанавливаем соответствующее задающее воздействие g и наблюдаем за выходом y . Однако через 5 секунд после начала на объект регулирования (ОР) воздействует возмущающее воздействие v - отрицательное воздействие в одну условную единицу (например, через 5 секунд нагрузили двигатель). В результате на выходе вместо требуемого значения выходной величины в 2 условные единицы мы наблюдаем 1 условную единицу. Таким образом, в разомкнутой системе не удастся регулировать ОР требуемым образом.



Задача регулирования

Регулирование по возмущающему воздействию

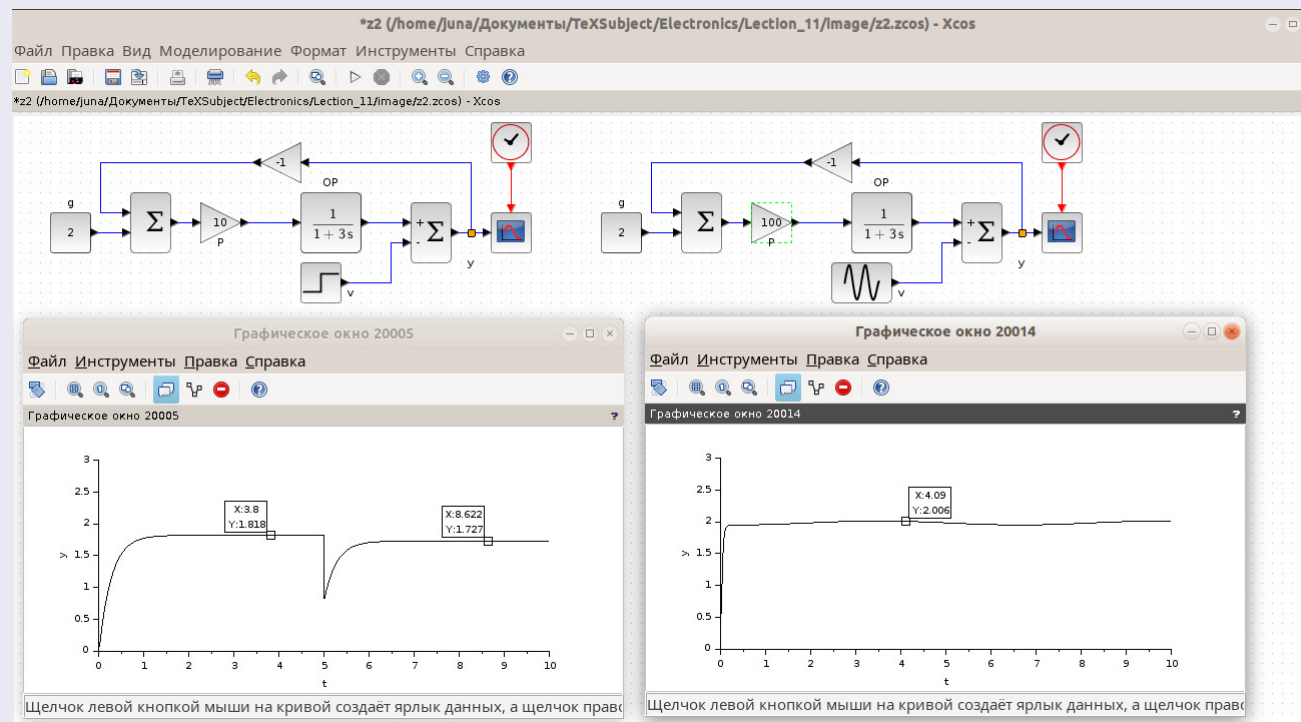
Для регулирования, очевидно, нужна информация о том, что происходит на выходе y , т.е. нужна обратная связь. Рассмотрим идею регулирования по возмущающему воздействию. В этом случае в качестве обратной связи выбирается заданное возмущающее воздействие. Для этого мы используем датчик и специальное устройство - регулятор, корректирующий задающее воздействие на величину возмущающего. В последнем случае есть частота сигнала, начиная с которой система не сможет регулировать ОР за счет его инерционности. Более того сам датчик возмущающего воздействия неидеален и дает погрешности. А если кроме учтенного воздействия возникает другое, то нужен еще датчик.



Задача регулирования

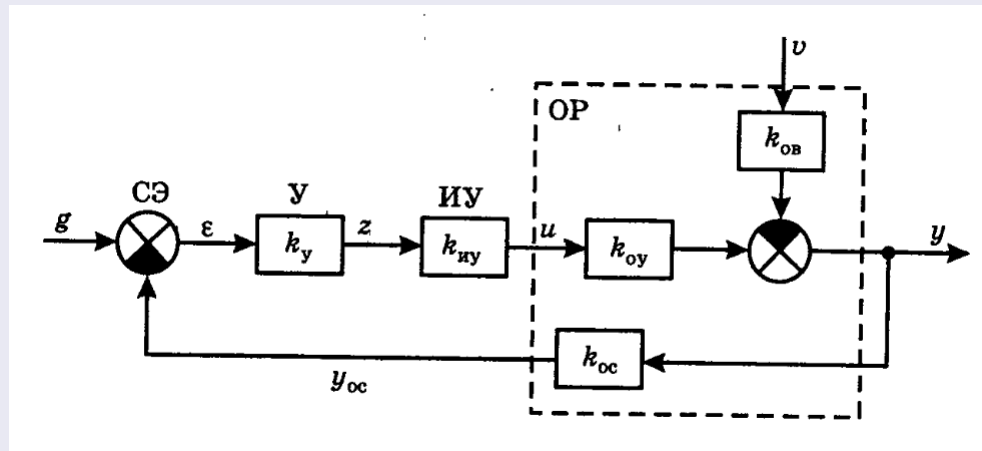
Регулирование по отклонению

Более универсальным является регулирование по отклонению. В этом случае сигнал снимается с выхода объекта регулирования, т.е. контролируется сама выходная величина y . Для регулирования задающего воздействия она учитывается с отрицательной обратной связью. В прямой ветви после сумматора используется специальное устройство - регулятор. В данном случае в качестве регулятора использовано простое пропорциональное (усилительное) звено с достаточно большим коэффициентом усиления.



Статический расчет замкнутой системы автоматического регулирования

На рисунке показана структурная схема замкнутой САР. На схеме обозначено: ОР - объект регулирования; ИУ - исполнительное устройство; У - усилительно-преобразовательное устройство; y - выходная величина, являющаяся регулируемой величиной ОР; v - возмущающее воздействие; u - управляющее воздействие на объект; g - задающее воздействие; ϵ - рассогласование; $k_{oy}, k_{ов}$ - коэффициенты передачи ОР по управляющему и возмущающему воздействиям; $k_{иу}, k_y$ - коэффициенты передачи ИУ и У соответственно; $k_{ос}$ - коэффициент передачи датчика обратной связи.



Запишем возникающие взаимосвязи в условиях статики (без учета переходных процессов):

$$У: z = k_y \epsilon; \text{ ИУ: } u = k_{иу} z$$

$$\text{ОР: } y = k_{oy} u - k_{ов} v; \text{ ОС: } y_{ос} = k_{ос} y$$

$$\text{СЭ: } \epsilon = g - y_{ос}$$

Статический расчет замкнутой системы автоматического регулирования

$$\begin{aligned}y &= k_{oy}u - k_{ов}v \\ u &= k_{иу}k_y(g - k_{ос}y)\end{aligned}$$

Совместное решение перечисленных уравнений дает:

$$y = \frac{k_y k_{иу} k_{oy}}{1 + K} \cdot g - \frac{k_{ов}}{1 + K} \cdot v$$

где $K = k_y k_{иу} k_{oy} k_{ос}$

Таким образом, видно, что чем больше K , тем меньше влияние v на y , а значит выше точность.

Этого можно добиться увеличивая коэффициент пропорциональности регулятора. Однако, если его сильно увеличить система оказывается очень чувствительной (двигатель постоянно будет пытаться отрабатывать любое воздействие - будет дергаться). Это приводит к быстрому износу объекта регулирования.

Поэтому управление является в известном смысле компромиссом: с одной стороны, нужно увеличивать K , чтобы повысить точность, а с другой – нужно уменьшать K , чтобы уменьшить влияние шума измерения и уменьшить износ.

Статический расчет замкнутой системы автоматического регулирования

При выборе управления мы шли самым простым путем, остановившись на регуляторе-усилителе (П-регуляторе). Возникают вопросы следующего характера:

- любым ли объектом можно управлять с помощью регулятора-усилителя?
- как правильно выбрать коэффициент K (на каком значении остановиться)?
- можно ли добиться улучшения управления с помощью более сложного регулятора?
- какой регулятор нужно применить, чтобы улучшить управление?
- как обеспечить нулевую установившуюся ошибку и можно ли это сделать вообще?
- как подавить шумы измерений?

Статический расчет замкнутой системы автоматического регулирования

Статическая ошибка замкнутой системы

Под статической ошибкой понимают отклонение выходного значения y от требуемого эталонного значения: $y_{\text{эталон}} = k_{\text{эт}} \cdot g$ в установившемся режиме.

Тогда получаем:

$$\delta = y_{\text{эталон}} - y = \left(k_{\text{эт}} - \frac{k_y k_{\text{иу}} k_{\text{оу}}}{1 + K} \right) \cdot g - \frac{k_{\text{ов}}}{1 + K} \cdot v$$

Из уравнения видно, что статическая ошибка имеет две составляющие:

$$\delta = \delta_g + \delta_v$$

где δ_g - статическая ошибка по задающему воздействию g , статическая ошибка по возмущению v . Если одна из составляющих равна нулю, то систему называют астатической по соответствующему воздействию. В частности статическая ошибка по задающему воздействию равна нулю при

$$k_{\text{эт}} = \frac{k_y k_{\text{иу}} k_{\text{оу}}}{1 + K}$$

Это означает, что всегда можно подобрать необходимое задающее воздействие g , чтобы вытянуть выходное значение y на заданный уровень.

В тоже время статическую ошибку по возмущающему воздействию нельзя полностью нивелировать с помощью задающего воздействия g . Ее можно лишь уменьшить путем увеличения K .

Типовые законы автоматического регулирования

Закон автоматического регулирования - это уравнение регулятора, выражающее управляющее воздействие u через рассогласование ϵ .

Типовыми являются следующие законы регулирования по отклонению:

- Пропорциональный закон (П-регулятор):

$$u = k_p \epsilon$$

где k_p - коэффициент передачи регулятора.

- Пропорционально-дифференциальный закон (ПД-регулятор):

$$u = k_p \left(\epsilon + T_d \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \right)$$

где T_d - постоянная времени дифференцирования. Благодаря наличию производной регулятор при прочих равных условиях оказывает на ОР большее воздействие в условиях, если ϵ возрастает, и наоборот.

Регулятор как бы предваряет дальнейшее изменение регулируемой величины и благодаря этому устраняет рассогласование ϵ более быстро и плавно.

- Интегральный закон (И-регулятор):

$$u = k_p \int \epsilon dt$$

- Пропорционально-интегральный закон (ПИ-регулятор):

$$u = k_p \left(\epsilon + \frac{1}{T_i} \int \epsilon dt \right)$$

где T_i - постоянная времени интегрирования.

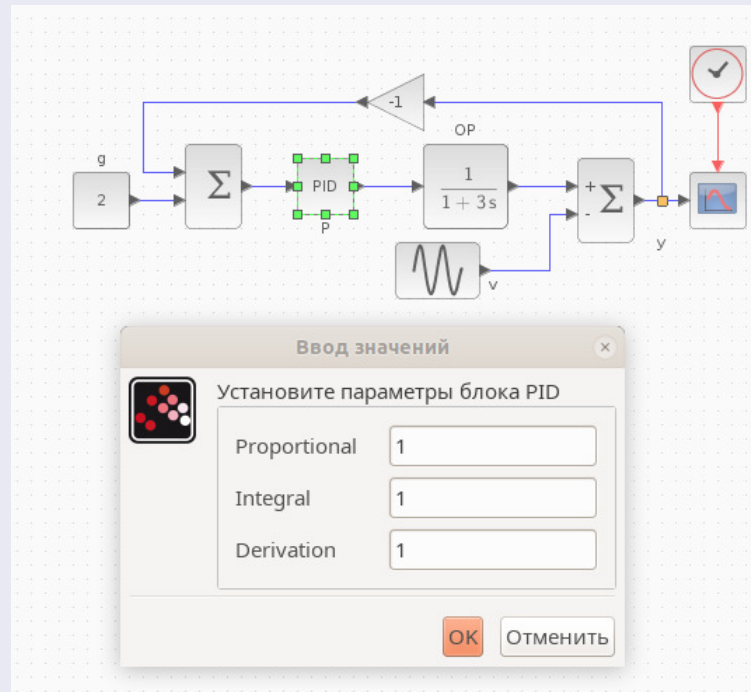
Типовые законы автоматического регулирования

- Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-регулятор):

$$u = k_p \left(\epsilon + \frac{1}{T_i} \int \epsilon dt + T_d \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \right)$$

Все регуляторы, содержащие интеграл обеспечивают астатическое регулирование по задающему воздействию (т.е. $\epsilon = 0$ в статике).

Типовая инженерная задача расчета и проектирования САР сводится к выбору закона регулирования и расчету параметров регулятора k_p , T_i , T_d . Для проверки выбранного закона часто используют моделирование на ЭВМ.



Классификация систем автоматического регулирования

Классификация САР проводится по ряду признаков:

- По виду уравнений: линейные, нелинейные.
- По зависимости коэффициентов уравнений от времени: стационарные, нестационарные.
- По характеру передачи воздействия от входа к выходу: непрерывные (все элементы непрерывно передают воздействие от входа к выходу), дискретные (релейные, импульсные, цифровые).
- По характеру изменения задающего воздействия во времени: системы стабилизации (если входное воздействие постоянная величина), системы программного регулирования (если входное воздействие известная функция времени), следящие системы (если входное воздействие случайная функция времени).
- По точности в статическом режиме: статические, астатические.
- По количеству контуров: одноконтурные, многоконтурные.
- По количеству регулируемых величин: одномерные, многомерные.
- По наличию дополнительных связей между регуляторами: несвязанное, связанное регулирование (имеет смысл для многомерных систем).
- По достигаемому уровню качества регулирования: обыкновенные, оптимальные.
- По способности приспосабливаться к изменяющимся характеристикам объекта и внешних воздействий: системы с жесткой настройкой, адаптивные.