«Датчики физических величин»

1. Введение в курс

Разделы курса «Датчики физических величин»

1.ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ, КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (САР)

2. ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОЙ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

3.ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

4.МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

5.МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ

6.ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

7.РЕЛЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

8. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ

9. МИКРОПРОЦЕССОРЫ

Лекция 1.
«ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ, КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (САР)»

1.1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.2. Передаточные функции линейной системы. Структурные схемы и их преобразования

1.3. Статика систем автоматического регулирования

1.4. Понятие об устойчивости систем автоматического регулирования

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

Совокупность операций для пуска, остановки процесса, поддержания постоянства показателей процесса или изменения их по заданному закону называется ***управлением***.

Устройство, осуществляющее технологический процесс, показателями которого нужно управлять или регулировать, называется ***объектом управления***, или ***управляемым объектом***.

Техническое устройство, осуществляющее управление в соответствии с программой (алгоритмом), называется ***автоматическим управляющим устройством***.

Совокупность объекта управления и управляющего устройства называется ***системой автоматического управления*** (САУ).

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

Рассмотрим пример регулирования по замкнутому циклу с контролем результата – расхода *Q*. На рис. 1.1 приведена структурная схема регулятора (стабилизатора) расхода промывочной жидкости *Q*. Здесь расход *Q* контролируется датчиком расхода ДР. Задатчиком З посредством регулировки напряжения $U_{зад}$ устанавливается требуемый расход Q. Частота оборотов вала двигателя *n* (следовательно и расход Q) определяется нагрузкой и напряжением $U_г$, которое зависит от значения ΔU.

$$\Delta U = U_{зад} - U_{ос1},$$

где $U_{ос1}$– напряжение на выходе датчика ($U_д$), пропорциональное расходу *Q*, и называется напряжением обратной связи. И эта связь в данном случае отрицательная (условно обозначается закрашиванием сектора): уменьшает значение $U_{зад}$. При отклонении по каким либо причинам расхода *Q* от заданного значения изменяется и $U_{ос1}$, что приводит к изменению *n* и тем самым к восстановлению расхода *Q*.

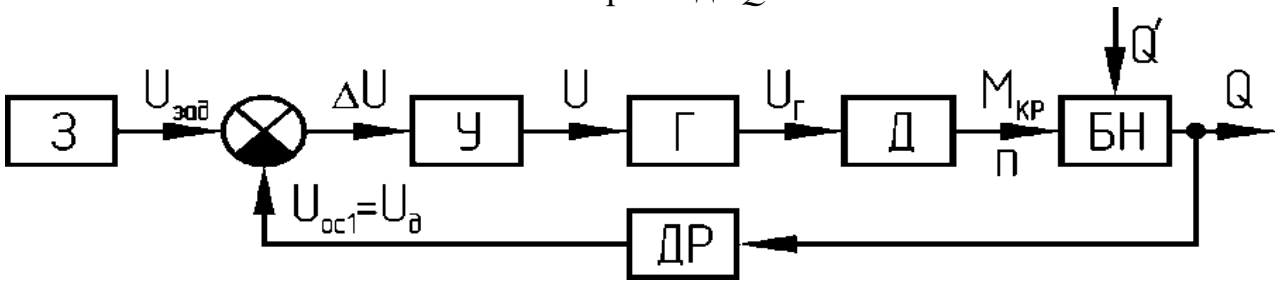

Рис. 1.1. Структурная схема и автоматического регулятора (стабилизатора) расхода промывочной жидкости: З – задатчик, У– усилитель, Г – генератор, Д – двигатель, БН – буровой насос, ДР – датчик расхода (звено обратной связи), Q – производительность насоса (интенсивность промывки)

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

Автоматическое поддержание заданного закона изменения показателей процесса с помощью обратной связи называется ***автоматическим регулированием***. В рассмотренном примере один показатель – Q. И он называется ***регулируемой величиной***.

автоматическое устройство, осуществляющее автоматическое регулирование, называется ***автоматическим регулятором***.

В свою очередь, управляемый регулятором объект, называется ***регулируемым объектом***.

Совокупность регулируемого объекта и автоматического регулятора составляют ***систему автоматического регулирования*** (САР).

По функциональному назначению автоматические системы могут быть подразделены на разомкнутые системы автоматического управления, замкнутые системы автоматического управления и системы автоматического контроля.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1. *Пример*. Схема стабилизатора тока накала электронных ламп (рис.1.2) – регулирование по разомкнутому циклу.

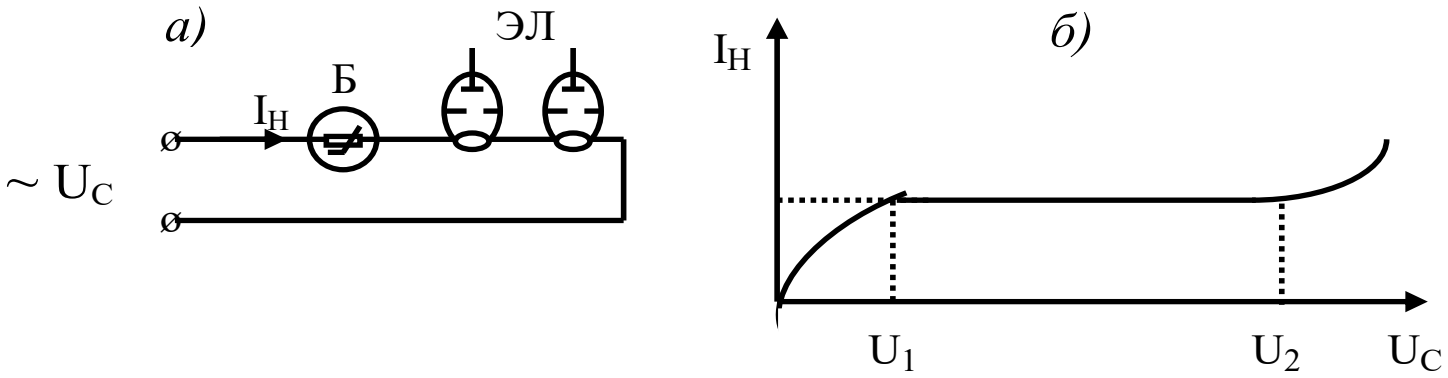

Рис.1.2. Электрическая схема стабилизатора тока (а) и нелинейная характеристика бареттера (б): Б – бареттер, ЭЛ – электронные лампы

Поддержание постоянства тока накала $I_Н$ происходит без участия оператора, т.е. контроля нет.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

2. *Пример* системы ручного регулирования частоты вращения ω вала электрического двигателя (рис.1.3).

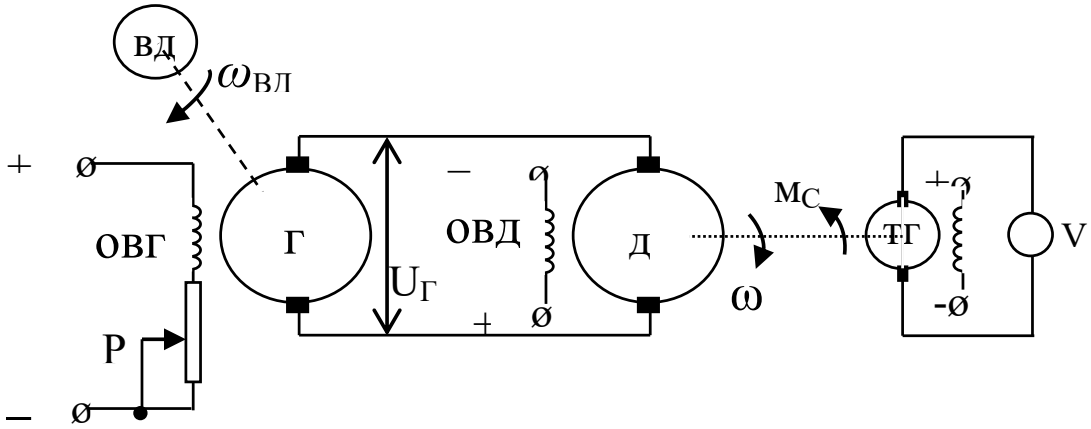

Рис.1.3. Электрическая схема ручного регулирования частоты вращения вала двигателя:

Г – генератор, ОВГ – обмотка возбуждения генератора, ВД – вспомоательный двигатель, Д – двигатель, ОВД – обмотка возбуждения двигателя, ТГ – тахогенератор, V – вольтметр, Р – реостат.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.1. Принципы регулирования

Различают следующие основные принципы регулирования:

- по отклонению;
- по возмущению;
- компенсации;
- комбинированный

На рис.1.4 приведена схема автоматического регулирования (стабилизации) частоты оборотов вала двигателя с использованием одного датчика (тахогенератора) контроля отклонения частоты оборотов от заданного значения.

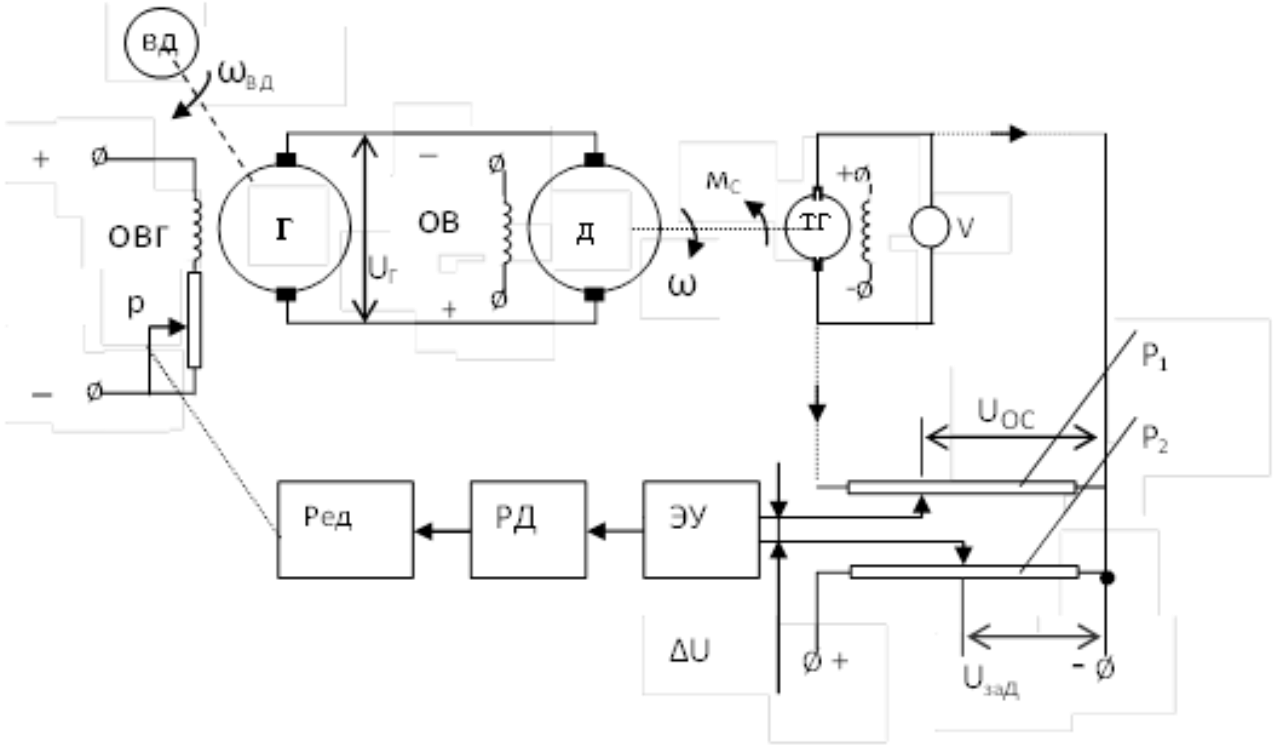

Рис.1.4. Преобразование схемы ручного регулирования в автоматическую систему регулирования частоты оборотов вала

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.1. Принципы регулирования

Принцип регулирования, который заложен в рассмотренной схеме, называется ***принципом регулирования по отклонению***. Системы, выполненные по этому принципу, всегда содержат обратную связь, т. е. работают по замкнутому циклу.

Системой автоматического регулирования по отклонению называется такая система, при работе которой измеряется отклонение регулируемой величины от заданного значения и в функции от значения отклонения вырабатывается такое регулирующее воздействие, которое сводит это отклонение к минимуму.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.1. Принципы регулирования

На рис. 1.5 представлена схема генератора постоянного тока к пояснению принципа регулирования по возмущению (генератор работает на изменяющуюся нагрузку $R_н$). Регулируемой величиной является напряжение U. ЭДС генератора пропорциональна потоку возбуждения $\Phi_в \equiv E_г = k\,\Phi_в$.

Считаем, что изменение напряжения на зажимах генератора обусловлено только внутренним сопротивлением якорной цепи:

$$U = E - I_н \cdot R_a, \tag{1.1}$$

$$E = U + I_н \cdot R_a = I_н \cdot R_н + I_н \cdot R_a = I_н\,(R_a + R_н) \tag{1.2}$$

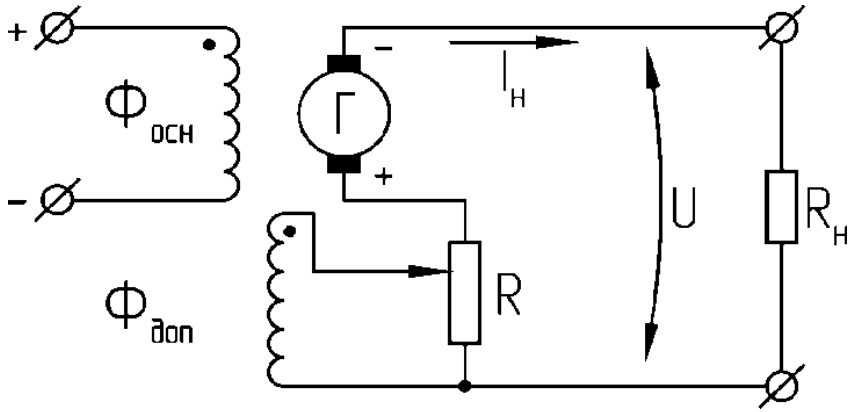

Рис.1.5. Принципиальная схема регулятора, использующего принцип регулирования по возмущению

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.1. Принципы регулирования

Необходимо, чтобы при изменении тока $I_н$ напряжение $U = U_o = \text{const}$. Для этого должно быть выполнено условие

$$E = U_o + \Delta E = U_o + I_н R_a = k\,(\Phi_{во} + \Delta\Phi_в),$$

т.е. ΔE изменяется за счет

$$\Phi_в.\ U_o = k \cdot \Phi_{во} \text{ и } \Delta\Phi_в = (Ra/k) \cdot I_н = c\, I_н,$$

т. е. изменение регулируемой величины $\Delta\Phi$ должно быть пропорционально току нагрузки $I_н$. Это условие выполняется постановкой компаундной обмотки, дающей дополнительный поток возбуждения $\Phi_{ДОП}$, пропорциональный нагрузке (возмущению) - току $I_Н$. Таким образом, основная обмотка (основной поток возбуждения $\Phi_{ОСН}$) служит для создания начального напряжения $U_О$, а ΔE определяется компаундной обмоткой. Обе обмотки создают суммарный магнитный поток $\Phi_{ВО.}$

При изменении тока нагрузки $I_Н$ изменяется суммарный поток $\Phi_{ВО}$, и напряжение Uo остается постоянным. Это и есть пример реализации ***принципа компенсации в регулировании***: измеряется нагрузка (возмущающее воздействие) и в функции от измеренного значения вырабатывается такое регулирующее воздействие, чтобы регулируемая величина осталась бы постоянной. Системы, работающие по принципу компенсации, относятся к системам разомкнутого типа, т. е. не имеют обратной связи.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

По закону воспроизведения (изменения) регулируемой величины замкнутые системы регулирования делятся на три вида:

- системы стабилизации,
- системы программного регулирования,
- следящие системы.

Отличаются они друг от друга не принципиально, а лишь режимом работы и конструктивно. Они имеют общую теорию и исследуются одинаковыми методами.

Система стабилизации – это система поддержания постоянства регулируемой величины. Рассмотренные выше системы относятся к системам стабилизации.

В системах программного регулирования регулируемая величина должна изменяться по заранее известной программе во времени.

Следящая система. Здесь регулируемая величина изменяется по неизвестному произвольному закону. Закон определяется некоторым внешним задающим воздействием (произвольно).

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

В зависимости от характера регулирующего воздействия на исполнительный элемент системы автоматического регулирования подразделяются на:

- системы непрерывного,
- импульсного и
- релейного регулирования.

В системах *непрерывного* регулирования сигналы на выходе всех элементов системы являются непрерывными функциями сигналов на входе элементов.

Системы *импульсного* регулирования отличаются тем, что в них через определенные промежутки времени происходит размыкание и замыкание контура регулирования специальным устройством. Время регулирования делится на импульсы, в течение которых процессы протекают так же, как и в системах непрерывного регулирования, и на интервалы, в течение которых воздействие регулятора на систему прекращается.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

В системах *релейного* регулирования размыкание контура регулирования производится одним из элементов системы (релейным элементом) в зависимости от внешнего воздействия.

В зависимости от результатов, получаемых при автоматическом регулировании, различают два вида автоматического регулирования:

- статическое и
- астатическое.

Статическим называется такое автоматическое регулирование, при котором регулируемая величина при различных постоянных внешних воздействиях на объект регулирования принимает по окончании переходного процесса различные значения, зависящие от величины внешнего воздействия (например, нагрузки).

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

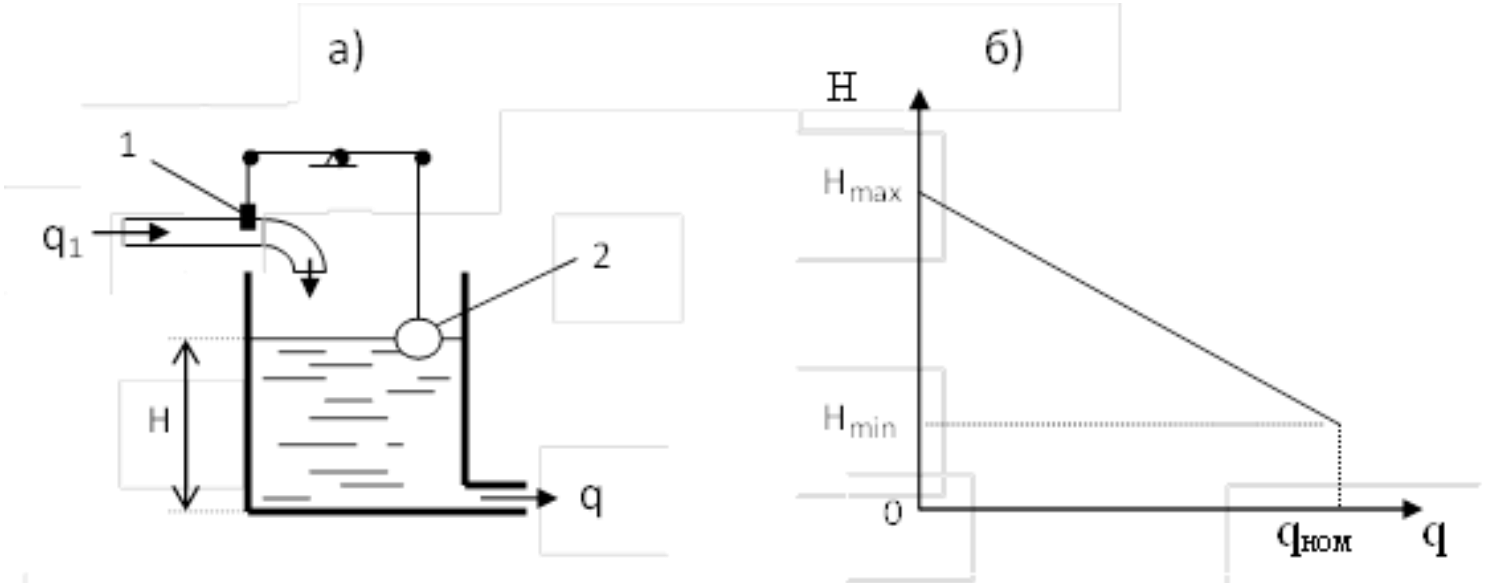

Рис. 1.6. Статический регулятор уровня воды прямого действия:
а) – схема регулятора, б) – характеристика регулятора; 1 – задвижка,

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

регулятор уровня воды в баке. В регуляторе уровня воды при увеличении расхода воды q уровень снижается, через поплавок и рычаг открывается задвижка, приток q_1 возрастает и наоборот.

Система статического регулирования имеет следующие характерные свойства:

– равновесие системы возможно при различных значениях регулируемой величины;

– каждому значению регулируемой величины соответствует единственное определенное положение регулирующего органа.

Для осуществления такой связи между датчиком и исполнительным элементом контур регулирования должен состоять из так называемых статических звеньев, у которых в состоянии равновесия выходная величина однозначно зависит от входной: $x_{вых} = f(x_{вх})$. К приведенному примеру регулятора объяснение свойств следующее: расход воды q равен притоку q_1 при каком-то строго определенном, своем уровне H; изменится расход, изменится уровень, приток будет равен расходу – и опять наступит равновесие.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

регулятор уровня воды в баке. В регуляторе уровня воды при увеличении расхода воды q уровень снижается, через поплавок и рычаг открывается задвижка, приток q_1 возрастает и наоборот.

Система статического регулирования имеет следующие характерные свойства:

– равновесие системы возможно при различных значениях регулируемой величины;

– каждому значению регулируемой величины соответствует единственное определенное положение регулирующего органа.

Для осуществления такой связи между датчиком и исполнительным элементом контур регулирования должен состоять из так называемых статических звеньев, у которых в состоянии равновесия выходная величина однозначно зависит от входной: $x_{вых} = f(x_{вх})$. К приведенному примеру регулятора объяснение свойств следующее: расход воды q равен притоку q_1 при каком-то строго определенном, своем уровне H; изменится расход, изменится уровень, приток будет равен расходу – и опять наступит равновесие.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

регулятор уровня воды в баке. В регуляторе уровня воды при увеличении расхода воды q уровень снижается, через поплавок и рычаг открывается задвижка, приток q_1 возрастает и наоборот.

Система статического регулирования имеет следующие характерные свойства:

– равновесие системы возможно при различных значениях регулируемой величины;

– каждому значению регулируемой величины соответствует единственное определенное положение регулирующего органа.

Для осуществления такой связи между датчиком и исполнительным элементом контур регулирования должен состоять из так называемых статических звеньев, у которых в состоянии равновесия выходная величина однозначно зависит от входной: $x_{вых} = f(x_{вх})$. К приведенному примеру регулятора объяснение свойств следующее: расход воды q равен притоку q_1 при каком-то строго определенном, своем уровне H; изменится расход, изменится уровень, приток будет равен расходу – и опять наступит равновесие.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

Регулятор, осуществляющий статическое регулирование, называется *статическим* регулятором.

Для характеристики степени зависимости отклонения регулируемой величины от нагрузки в теории регулирования пользуются понятием *неравномерности, или статизма* регулирования.

Пусть график зависимости установившихся значений регулируемой величины x от нагрузки q (характеристика регулирования) имеет вид, изображенный на рис.1.6, б (характеристика регулирования дана в конкретных координатах для регулятора уровня воды в баке; ниже координаты приводятся в общем виде, для любых статических регуляторов). Максимальное значение регулируемой величины $x_{\max}$ соответствует холостому ходу объекта (нагрузка отсутствует); минимальное значение $x_{\min}$ – номинальной нагрузке – $q_{ном}$.

Для определения статизма регулирования воспользуемся относительными координатами:

$$\varphi = \frac{x}{x_{\min}}, \qquad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{q}{q_{ном}}, \qquad (1.4)$$

где φ – относительное значение регулируемой величины;

x – сама регулируемая величина;

$x_{\min}$ – минимальное значение регулируемой величины (при номинальном режиме);

$x_{\min}$ и $q_{ном}$ – базовые значения величин;

λ – относительное значение нагрузки.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

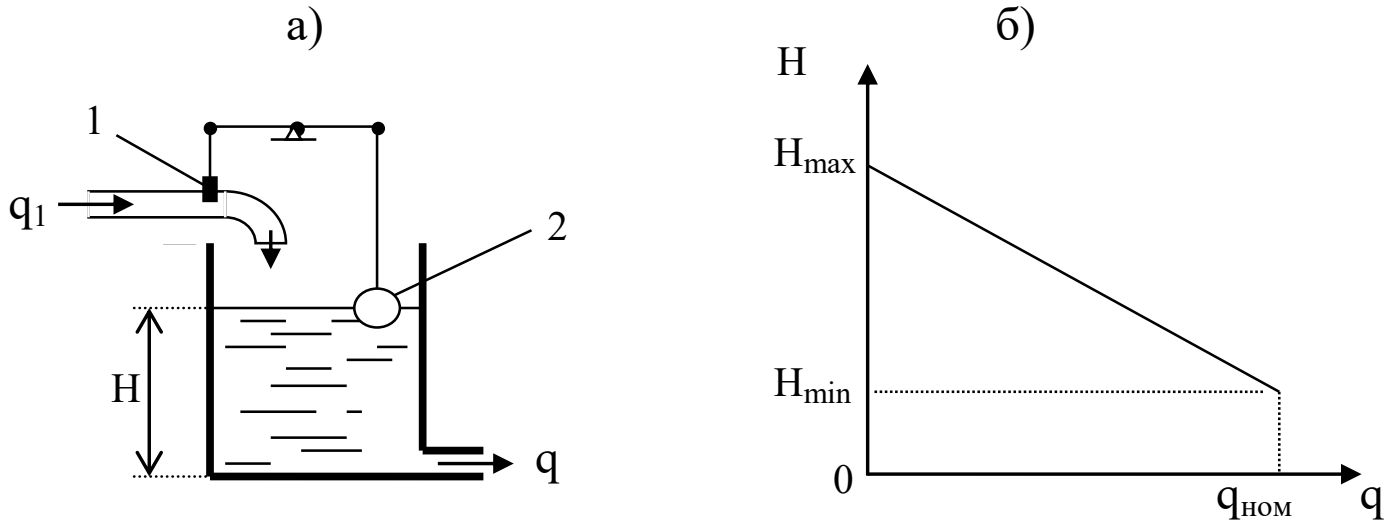

Рис. 1.6. Статический регулятор уровня воды прямого действия: а) – схема регулятора, б) – характеристика регулятора; 1 – задвижка, 2 – поплавок

Тогда неравномерность δ (или статизм) системы в общем случае есть частная производная в данной точке (или относительная крутизна характеристики регулирования в этой точке):

$$\delta = -\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \qquad (1.5)$$

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

Если характеристика регулирования линейная, то статизм будет постоянной величиной для всех значений нагрузки. И он может быть определен следующим образом:

$$\delta = -\frac{\Delta\varphi_{\max}}{\Delta\lambda_{\max}} = \frac{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\min}}}{\frac{q_{ном} - 0}{q_{ном}}} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\min}}, \qquad \delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\min}} \qquad (1.6)$$

Статический регулятор поддерживает не строго постоянное значение регулируемой величины, а с ошибкой, которая называется статической ошибкой системы. Таким образом, ***статизм регулирования*** - это относительная статическая ошибка при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной.

В некоторых системах статическая ошибка (даже если и сотые доли процента) нежелательна, тогда переходят к регулированию, при котором она равна нулю - к астатическому регулированию. Характеристика регулирования такой системы представляется линией, параллельной оси нагрузки.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

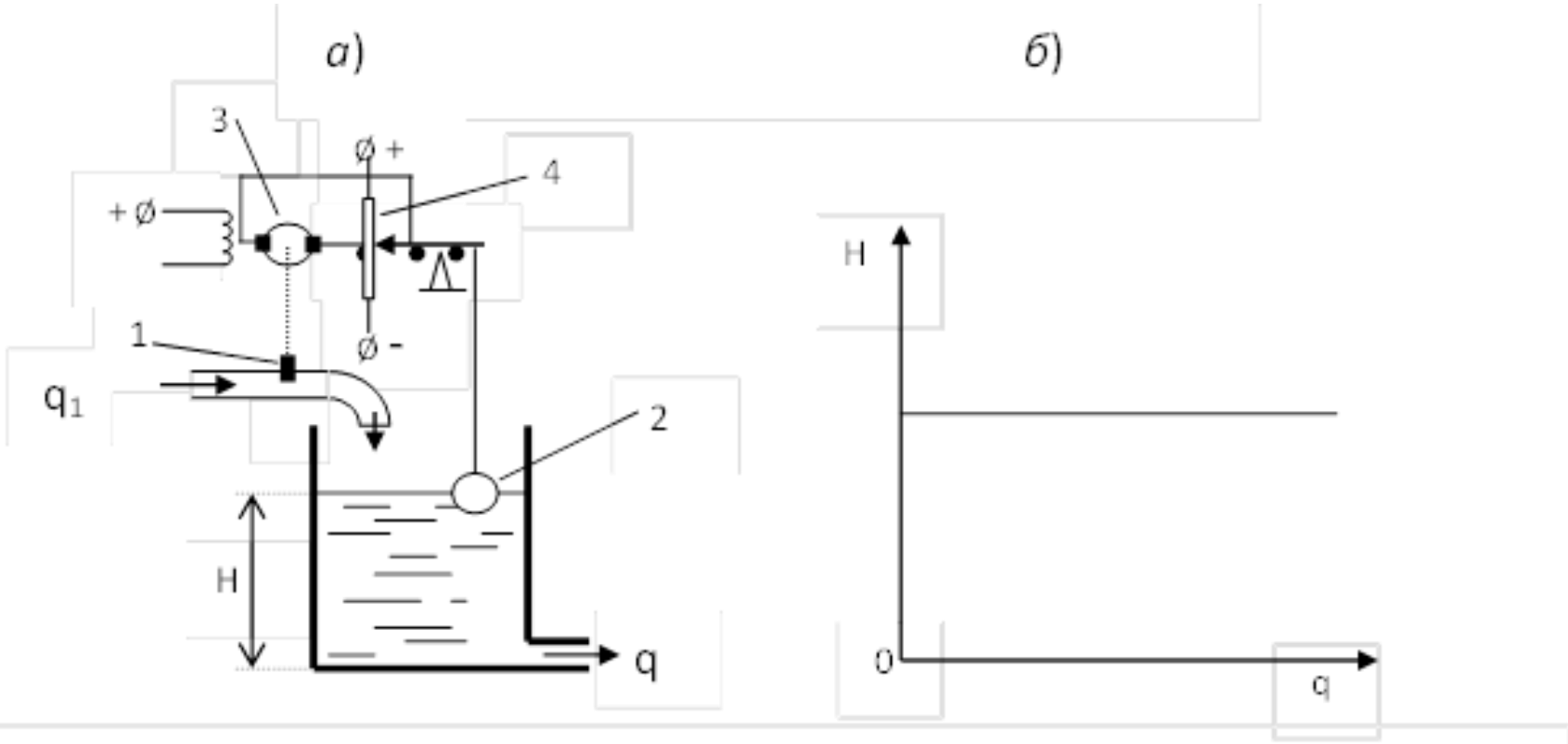

Рис. 1.7. Астатический регулятор уровня воды непрямого действия: а) – схема регулятора, б) – характеристика регулятора; 1 – задвижка, 2 –поплавок, 3 – электродвигатель постоянного тока, 4 – реостат.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

В зависимости от источника энергии, получаемой регулятором, различают

- прямое и
- непрямое регулирование**.**

В системах ***прямого регулирования*** энергия для перестановки управляющего элемента получается от датчика (как пример – статический регулятор уровня воды).

В системах ***непрямого регулирования*** энергия для перестановки управляющего элемента получается от постороннего источника (пример – астатический регулятор уровня воды).

Системы автоматического регулирования с несколькими регулируемыми величинами (например, давление пара в котле, подача воды в котел, подача топлива и воздуха в топку) подразделяются на системы несвязанного и связанного регулирования.

Системами несвязанного регулирования называются такие, в которых регуляторы, предназначенные для регулирования различных величин, не связаны друг с другом и могут взаимодействовать только через общий для них объект регулирования. Если в системе несвязанного регулирования изменение одной из регулируемых величин влечет за собой изменение других регулируемых величин, то такая система называется *зависимой*; и если не влечет, то система называется *независимой.*

Системами связанного регулирования называются такие, в которых регуляторы различных регулируемых величин связаны друг с другом и помимо объекта регулирования.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

Система связанного регулирования называется *автономной*, если связи между входящими в ее состав регуляторами таковы, что изменение одной из регулируемых величин в процессе регулирования не вызывает изменения остальных регулируемых величин.

Замкнутые системы автономного регулирования, имеющие только одну (главную) обратную связь, называются *одноконтурными*. Системы автоматического регулирования, имеющие помимо одной главной обратной связи еще одну или несколько главных или местных обратных связей, называются *многоконтурными*.

В зависимости от вида характеристик элементов, из которых состоят системы, все системы делятся на:

- линейные и
- нелинейные.

Линейными называются системы, которые состоят только из элементов, имеющих линейные характеристики; переходные процессы в таких элементах описываются линейными дифференциальными уравнениями.

Нелинейными называются системы, которые имеют один или несколько элементов с нелинейными характеристиками; переходные процессы в таких системах описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.2. Классификация систем автоматического регулирования

При классификации *по виду используемой энергии* все системы можно подразделить на:

- электрические,
- гидравлические,
- пневматические,
- электрогидравлические,
- электропневматические и т. д.

В зависимости *от числа регулируемых величин* системы автоматического регулирования (САР):

- одномерные,
- двухмерные,
- многомерные.

Многомерные САР могут быть системами несвязанного и связанного регулирования. Система связанного регулирования может быть автономной.

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.3. Алгоритм (закон) регулирования

Всякую систему автоматического регулирования можно рассматривать как вычислительное устройство, которое вырабатывает регулирующее воздействие в функции от величины рассогласования ε , нагрузки q и других величин.

А сама функциональная связь, функциональная зависимость, между желаемым регулирующим воздействием на объект y_o, величиной рассогласования ε, нагрузкой q , производных и интегралов двух последних величин, называется ***алгоритмом регулятора или законом регулирования***.

Аналитически в общем виде

$$y_o = f\left(\varepsilon,\ \varepsilon',\ \varepsilon'',\ \ldots \int_0^t \varepsilon\, dt, \ldots q,\ q',\ q'', \ldots\right) \qquad (1.7)$$

По виду этой функциональной зависимости и различают принципы регулирования.

Например, алгоритм регулятора по отклонению будет иметь зависимость:

$$y_o = f\left(\varepsilon,\ \varepsilon',\ \varepsilon'',\ \ldots \int_0^t \varepsilon\, dt\right) \qquad (1.8)$$

Алгоритм регулятора по нагрузке:

$$y_o = f\left(q,\ q',\ q'', \ldots\right) \qquad (1.9)$$

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.3. Алгоритм (закон) регулирования

Уравнение (1.7) – алгоритм комбинированного регулирования.

Несколько конкретных алгоритмов регулирования:

– алгоритм пропорционального регулирования

$$y_o = a_0 \cdot \varepsilon , \qquad (1.10)$$

регулирующее воздействие пропорционально ε, и сами регуляторы называются ***П-регуляторами***;

– алгоритм регулирования пропорциональный с воздействием по первой производной:

$$y_o = a_0 \cdot \varepsilon + a_1 \cdot \varepsilon' , \qquad (1.11)$$

– алгоритм регулирования пропорциональный с воздействием по первой и второй производной:

$$y_o = a_0 \cdot \varepsilon + a_1 \cdot \varepsilon' + a_2 \cdot \varepsilon'', \qquad (1.12)$$

– интегральный закон регулирования – ***И-регулятор***:

$$y_o = b_0 \int_0^t \varepsilon \, dt, \qquad (1.13)$$

– алгоритм регулирования пропорциональный с воздействием по интегралу – ***ПИ-регулятор***:

$$y_o = a_0 \cdot \varepsilon + b_0 \int_0^t \varepsilon \, dt \qquad (1.14)$$

1. Основные понятия и определения теории автоматического регулирования

1.1.4. Основные требования к автоматическим системам управления

Непосредственно ***к самой САУ*** все ***требования*** можно разбить на следующие четыре категории:

– требования к величине запаса устойчивости;

– требования к величине отклонения регулируемого параметра в установившемся режиме (статическая точность);

– требования к поведению системы в переходном процессе (качество переходного процесса);

– требования к динамической точности системы, т.е. к величине отклонения при наличии непрерывно изменяющихся воздействий.

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

четыре основных типа дифференциальных уравнений и их графическое изображение.

1. Звено с одной входной и одной выходной величиной (рис.1.8); уравнением изображения этого звена будет:

$$X(s) = W(s)F(s), \tag{1.15}$$

а графическое изображение:

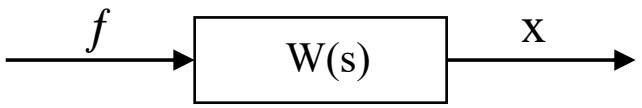

Рис. 1.8. Звено с одной входной и одной выходной величиной

1. Безинерционное звено с коэффициентом передачи K (рис.1.9):

$$x(t) = Kf(t) \tag{1.16}$$

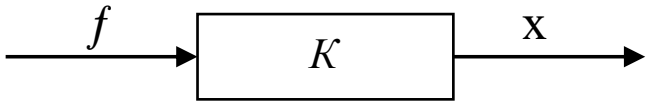

Рис. 1.9. Безинерционное звено

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

3. Звено с двумя входными и одной выходной величиной (рис.1.10):

$$X(s) = W(s)[F_1(s) - F_2(s)]$$

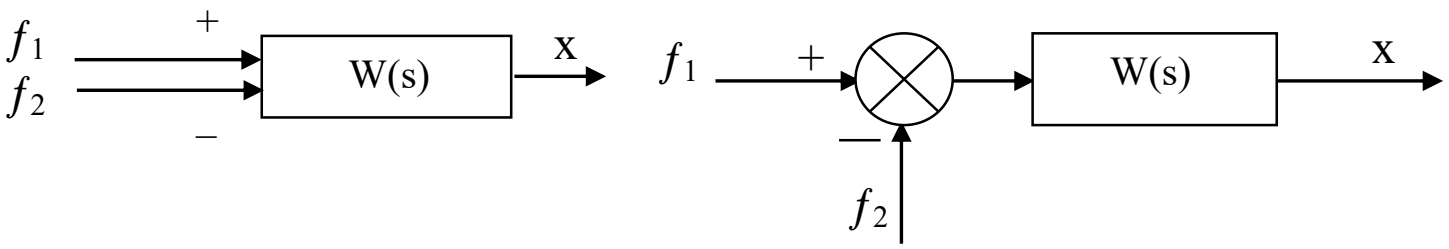

Рис.1.10. Две формы представления звена с двумя входными и одной выходной величиной

4. Звено с двумя передаточными функциями и двумя входными сигналами (рис.1.11):

$$X(s) = W_1(s)F_1(s) + W_2(s)F_2(s) \qquad (1.17)$$

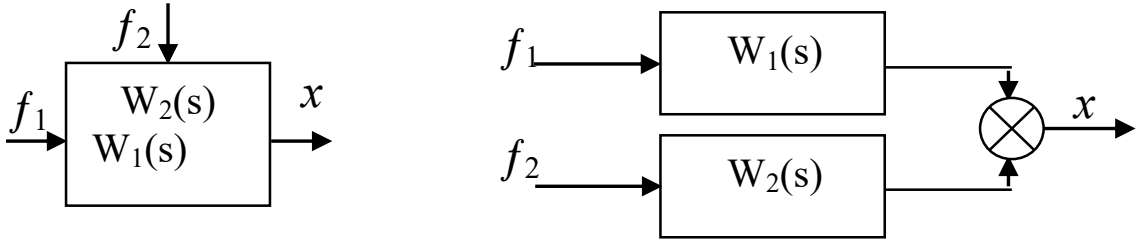

Рис.1.11. Две формы представления звена с двумя передаточными функциями и двумя входными сигналами

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

Используя эти изображения, составляются структурные схемы. Например, структурная схема ЭМУ в виде двух звеньев первого порядка:

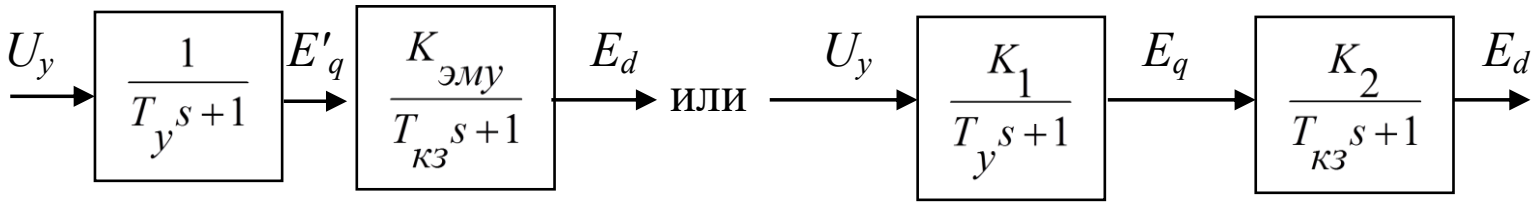

Рис.1.12. Структурная схема ЭМУ

Здесь: $K_1 = \frac{\nu_1 \omega_y}{r_y}$; $K_2 = \frac{\nu_2 \omega_q}{r_q}$ и $K_{эму} = K_1 \cdot K_2$

Для исследования системы необходимо знать ее передаточную функцию, для чего необходимо познакомиться с преобразованиями структурных схем.

1. *Последовательное соединение звеньев:* вход каждого последующего звена соединяется с выходом предыдущего (рис.1.13).

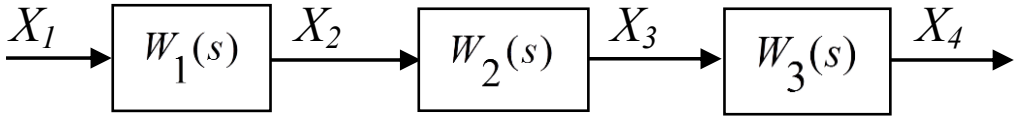

Рис.1.13. Последовательное соединение звеньев

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

$$X_2(s)=W_1(s)X_1(s),\qquad X_3(s)=W_2(s)X_2(s),\qquad X_4(s)=W_3(s)X_3(s)\quad \text{и}$$

$$X_4(s)=W_1(s)\cdot W_2(s)\cdot W_3(s)\cdot X_1(s)=W(s)\cdot X_1(s) \tag{1.18}$$

Итак, передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(s)=W_1(s)\cdot W_2(s)\cdot W_3(s) \tag{1.19}$$

2. Параллельное соединение звеньев: входная величина одинакова для звеньев, а выходные величины суммируются (рис.1.14):

$$X_1(s)=W_1(s)\cdot X_{вх}(s),\qquad X_2(s)=W_2(s)\cdot X_{вх}(s),\qquad X_3(s)=W_3(s)\cdot X_{вх}(s) \tag{1.20}$$

Уравнение сумматора:

$$X_{вых}(s)=X_1(s)+X_2(s)+X_3(s)=[W_1(s)+W_2(s)+W_3(s)]\cdot X_{вх}(s)\quad . \tag{1.21}$$

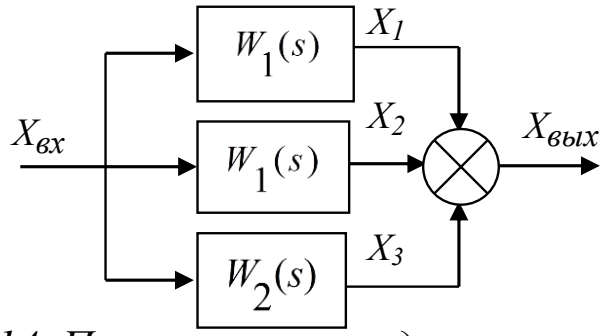

Рис.1.14. Параллельное соединение трех звеньев

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

Передаточная функция:

$$W(s) = W_1(s) + W_2(s) + W_3(s) \qquad (1.22)$$

Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций звеньев.

3. *Охват звена обратной связью* (рис.1.15). Исходные уравнения:

для охватываемого звена $X_{вых}(s) = W_o(s) \cdot X'(s)$, (1.23)

для звена обратной связи $X_{ос}(s) = W_{ос}(s) \cdot X_{вых}(s)$ (1.24)

для сумматора $X'(s) = X_{вх}(s) \pm X_{ос}(s)$, (1.25)

здесь знак “+” для ПОС, знак “–” для ООС.

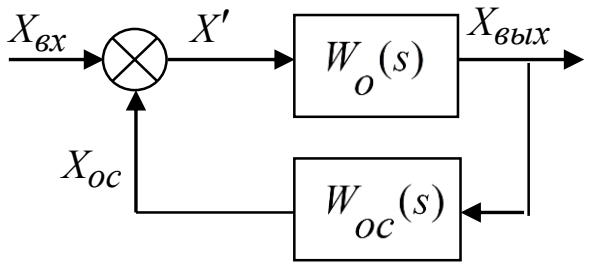

Рис.1.15. Охват звена обратной связью

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

В уравнениях исключаем промежуточные величины:

$$X_{вых}(s) = \frac{W_o(s)}{1 \mp W_o(s) \cdot W_{oc}(s)} \cdot Xвх(S) \qquad (1.26)$$

и передаточная функция

$$W(s) = \frac{W_o(s)}{1 \mp W_o(s) \cdot W_{oc}(s)} \qquad (1.27)$$

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

Основные правила преобразования структурных схем

1. Группу последовательного, параллельного соединения звеньев или охваченных обратной связью соединения звеньев можно заменить одним звеном с соответствующей передаточной функцией.

2. Точку приложения или съема воздействия можно переносить через одно или несколько звеньев, добавляя в преобразуемую цепь звено с такой передаточной функцией, чтобы выходной сигнал этой цепи не изменился.

Пример преобразования структурной схемы системы с перекрестной обратной связью (опущен оператор s) показан на рис. 1.16:

– для освобождения от перекрестной связи точка съема воздействия 1 переносится в точку 2 с добавлением в цепь обратной связи (W_5), звено с передаточной функцией W_3 (в соответствии с правилом 2);

– находится передаточная функция звена W_6 (последовательное соединение звеньев с передаточными функциями W_3 и W_5);

– находится передаточная функция звена W_7 (охват звена с передаточной функцией W_2 обратной связью – звено обратной связи с передаточной функцией W_6);

– находится передаточная функция звена W_8 (последовательное соединение звеньев с передаточными функциями W_1 и W_7);

- находится передаточная функция звена W_9 (охват звена с передаточной функцией W_8 обратной связью – звено обратной связи с передаточной функцией W_4);

– находится передаточная функция звена W_{10} – системы (последовательное соединение звеньев с передаточными функциями W_9 и W_3).

1.2. Передаточные функции линейных систем. Структурные схемы и их преобразования

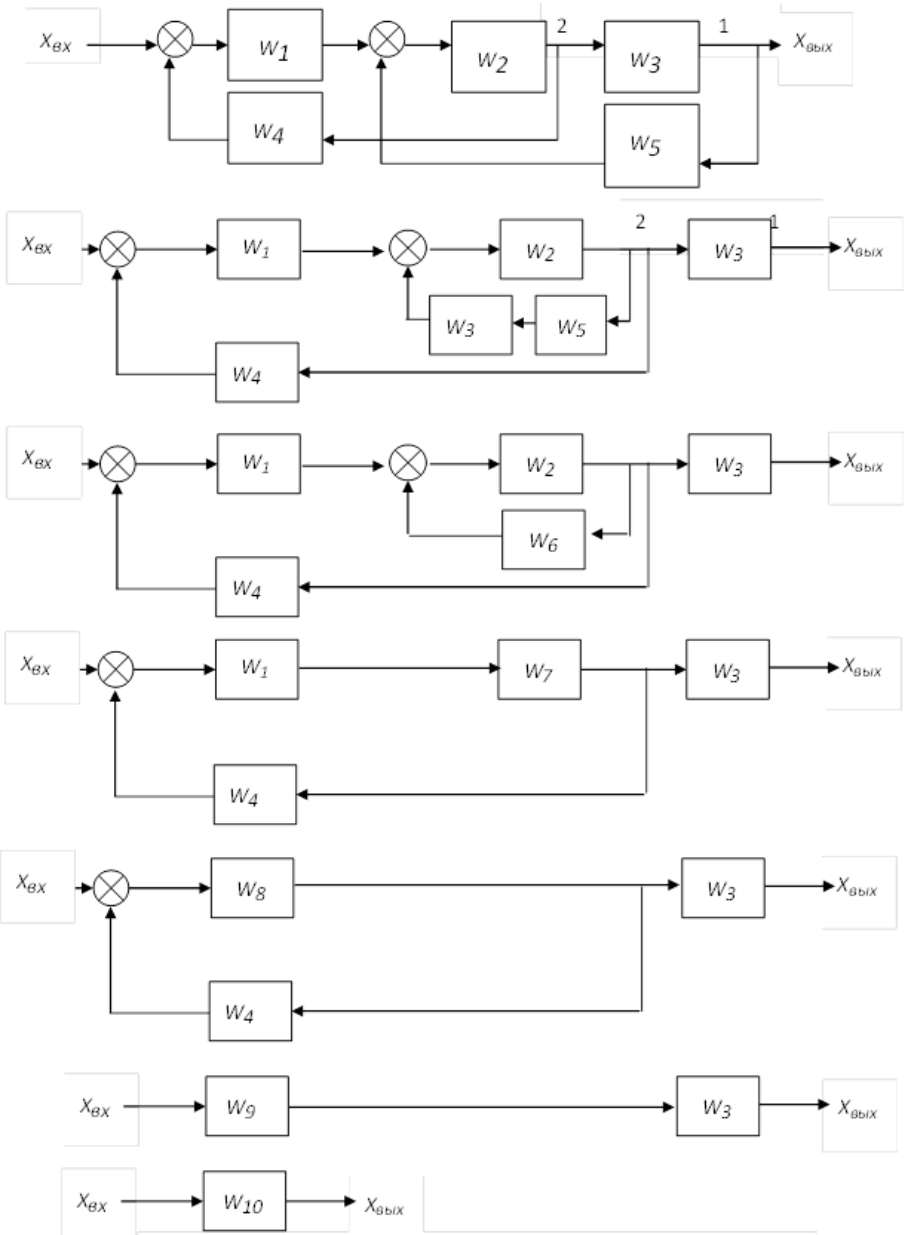

Рис.1.16. Пример преобразования структурной схемы

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Статика регулирования изучает равновесные, установившиеся состояния, которые имеют место при постоянных значениях возмущающих и управляющих воздействий на систему.

1.3.1. Статические характеристики элементов и звеньев САР

Всякий элемент системы регулирования может характеризоваться несколькими входными и выходными координатами (рис.1.17).

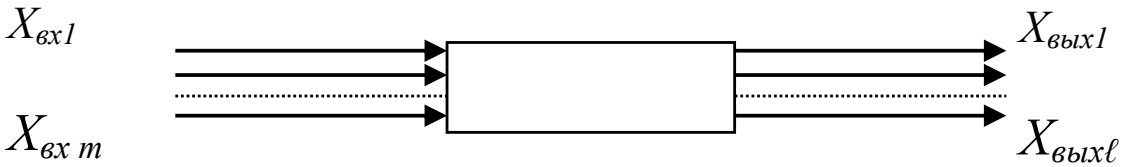

Рис. 1.17. Звено автоматической системы

Для звена в целом можно записать ℓ уравнений:

$$\left.\begin{aligned} X_{вых1} &= f_1\,(X_{вх1},\ \ldots X_{вх\ m}) \\ X_{вых2} &= f_2\,(X_{вх2},\ \ldots X_{вх\ m}) \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ X_{вых\ \ell} &= f_\ell\,(X_{вх\ \ell},\ \ldots X_{вх\ m}) \end{aligned}\right\} \quad (1.28)$$

Эта система уравнений, описывающая установившийся процесс, называется ***уравнениями статики звена***.

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Уравнения статики могут быть получены из уравнений динамики при приравнивании нулю всех производных от координат и от возмущающих воздействий, поскольку значения тех и других в установившемся режиме постоянны.

Возьмем частный случай, когда звено характеризуется одной координатой (одно управляющее воздействие, рис.1.18). Статическая характеристика такого звена: $X_{вых} = f(X_{вх})$.

Рис.1.18. Звено с одним управляющим воздействием

Такими простейшими статическими характеристиками описываются многие измерительные, преобразовательные, усилительные, управляющие элементы систем регулирования.

В зависимости от вида функции $f(X_{вх})$ звенья разделяются на статические, обладающие статической характеристикой, и астатические, не имеющие статической характеристики. Статические характеристики делятся на *линейные,* у которых функция $f(X_{вх})$ в рассматриваемом диапазоне изменения $X_{вх}$ и $X_{вых}$ есть линейная функция

$$X_{вых} = a + bX_{вх}, \qquad (1.29)$$

где a и b – постоянные, и нелинейные, у которых функция $f(X_{вх})$ имеет более сложный вид.

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Графически статическая характеристика линейного звена прямая - рис.1.19. Примером статической характеристики линейного звена является характеристика ненагруженного тахогенератора: $E = к\ \omega$ (коэффициент $a = 0$), где E – ЭДС тахогенераторара; ω – угловая скорость; k – коэффициент передачи тахогенератора.

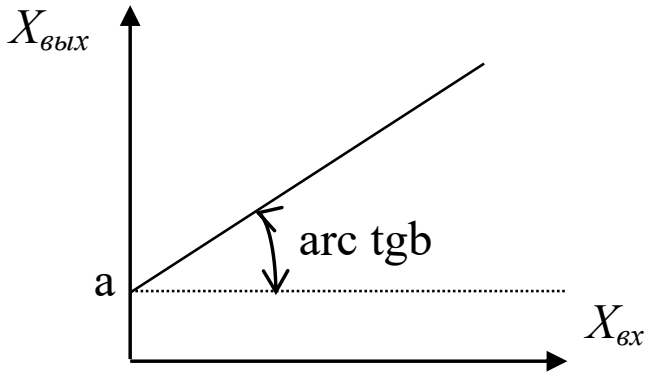

Рис. 1.19. Статическая характеристика линейного звена

Часто уравнение статики линейного звена приводят к виду, чтобы вместо текущих значений координат фигурировали их отклонения от некоторого начального значения:

$$\Delta X_{вх} = X_{вх} - X_{о\ вх}, \qquad (1.30)$$

где $X_{о\ вх}$ – начальное значение;

$X_{вх}$ – текущее значение.

Аналогично

$$\Delta X_{вых} = X_{вых} - X_{о\ вых}. \qquad (1.31)$$

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Подставим в первоначальное уравнение статики:

$$X_{о\ вых} + \Delta X_{вых} = a + b\ (X_{о\ вх} + \Delta\ X_{вх})$$

Очевидно, для начального состояния

$$X_{о\ вых} = a + bX_{о\ вх} \qquad (1.32)$$

Вычтем из (1.30) (1.31), получим уравнение статики в отклонениях:

$$\Delta X_{вых} = b \cdot \Delta X_{вх} \qquad (1.33)$$

Видим, выбыл коэффициент a, т. е. характеристика по уравнению статики в отклонениях всегда проходит через начало координат с тем же углом наклона (рис.1.20):

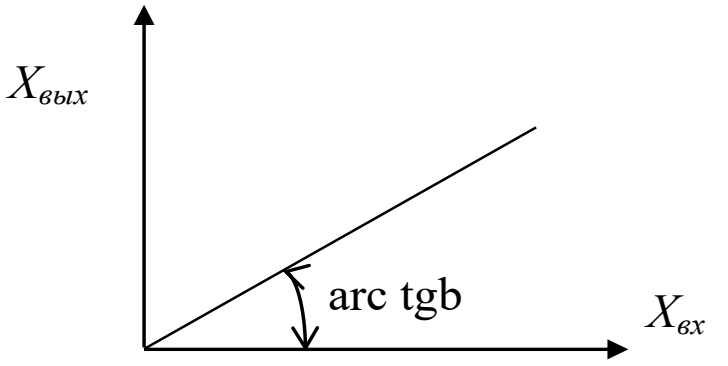

Рис. 1.20. Статическая характеристика линейного звена в

1.3. Статика систем автоматического регулирования

В САР есть звенья, характеризующиеся двумя входными координатами и одной выходной. К таким звеньям относятся все объекты регулирования: входными координатами объекта регулирования является регулирующее воздействие и возмущение. Статическая характеристика в данном случае выглядит:

$$\varphi = f(\mu, q), \qquad (1.34)$$

где φ – регулируемая величина объекта;

μ – регулирующее воздействие;

q – нагрузка.

Графически в треугольной системе координат функция изображается в виде поверхности (рис.1.21).

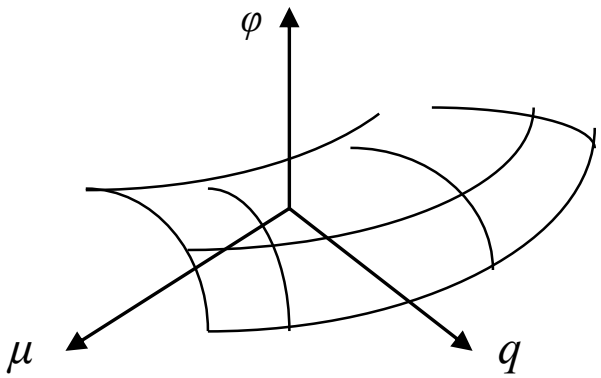

Рис.1.21.Изображение функции в треугольной системе координат

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Подобное изображение весьма неудобно. Поэтому статические характеристики объектов представляются на плоскости в виде семейства характеристик (рис.1.22):

$\varphi = f_1(\mu)\Big|_{q=\text{const}}$, либо $\varphi = f_2(q)\Big|_{\mu=\text{const}}$

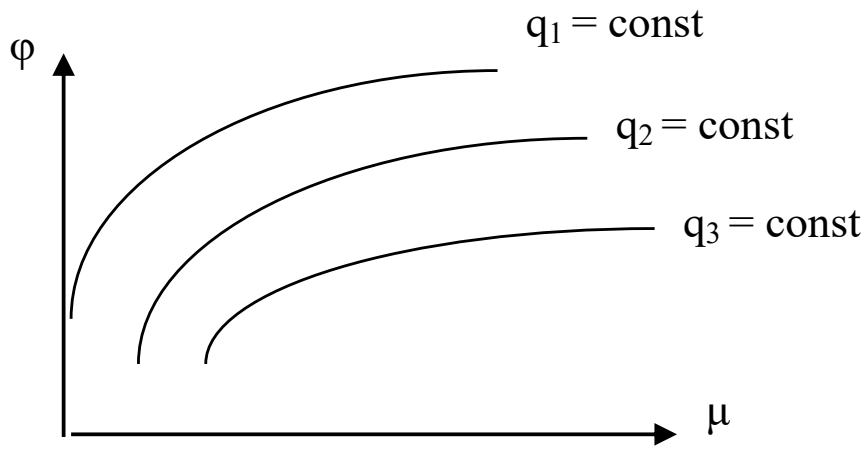

Рис.1.22. Статические характеристики, представленные в виде

1.3. Статика систем автоматического регулирования

1.3.2. Статические характеристики соединений звеньев

Многие звенья САР по своей конструкции являются направленными, т.е. воздействия в них передаются только в одном направлении. Ниже рассматриваются звенья направленного действия.

Наиболее употребительными соединениями звеньев являются:

- параллельное,
- последовательное и
- охват звена жесткой обратной связью.

Параллельное соединение звеньев.

При параллельном соединении звеньев входные координаты всех звеньев равны, а выходные суммируются (рис.1.23):

$$X_{вх1} = X_{вх2} = X_{вх3} = X_{вх}, \qquad X_{вых} = X_{вых1} + X_{вых2} + X_{вых3}$$

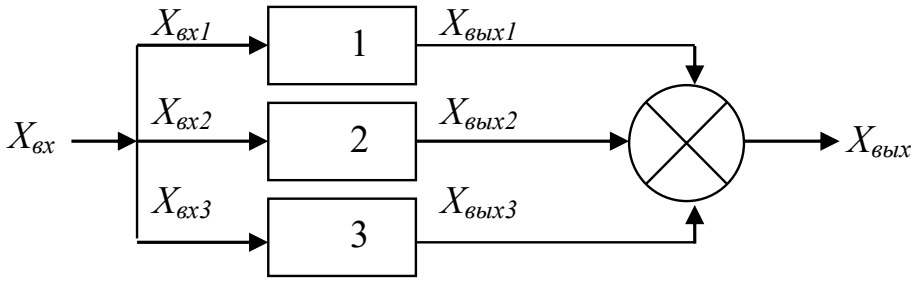

Рис.1.23. Параллельное соединение звеньев

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Для построения статической характеристики параллельных звеньев необходимо в одной системе координат с одинаковым масштабом построить статические характеристики отдельных звеньев и их ординаты сложить (рис.1.24).

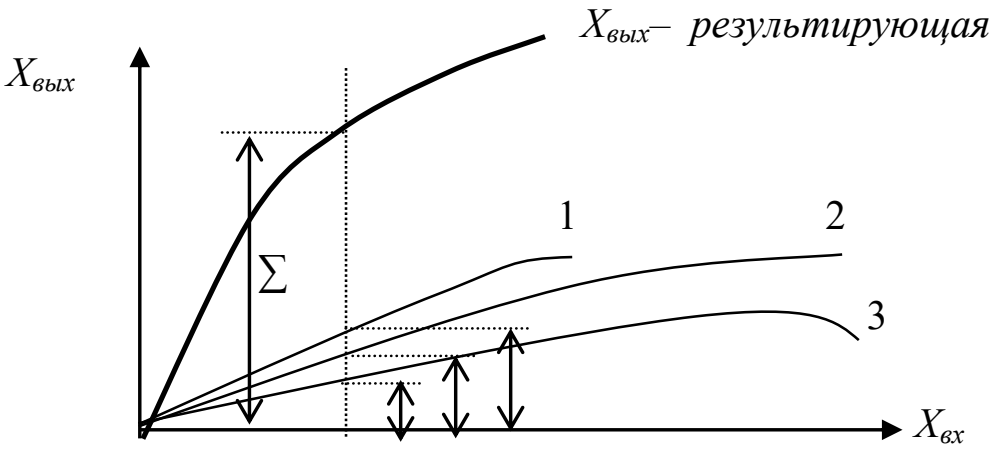

Рис.1.24. Построение статической характеристики системы из трех параллельно соединенных звеньев с нелинейными характеристиками

При линейных статических характеристиках:

$$\left.\begin{aligned} X_{вых1} &= k_1 \cdot X_{вх1}, \\ X_{вых2} &= к_2 \cdot X_{вх2}, \\ X_{вых3} &= к_3 \cdot X_{вх3}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X_{вых} &= (k_1 + k_2 + k_3 + \ldots + \end{aligned}\right\} \qquad (1.35)$$

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Последовательное соединение звеньев.

При последовательном соединении направленных звеньев выходные координаты предыдущего звена являются входными координатами последующего.

Для построения результирующей характеристики строятся отдельные характеристики в разных квадрантах. Наиболее простым является построение в случае трех звеньев (рис.1.25).

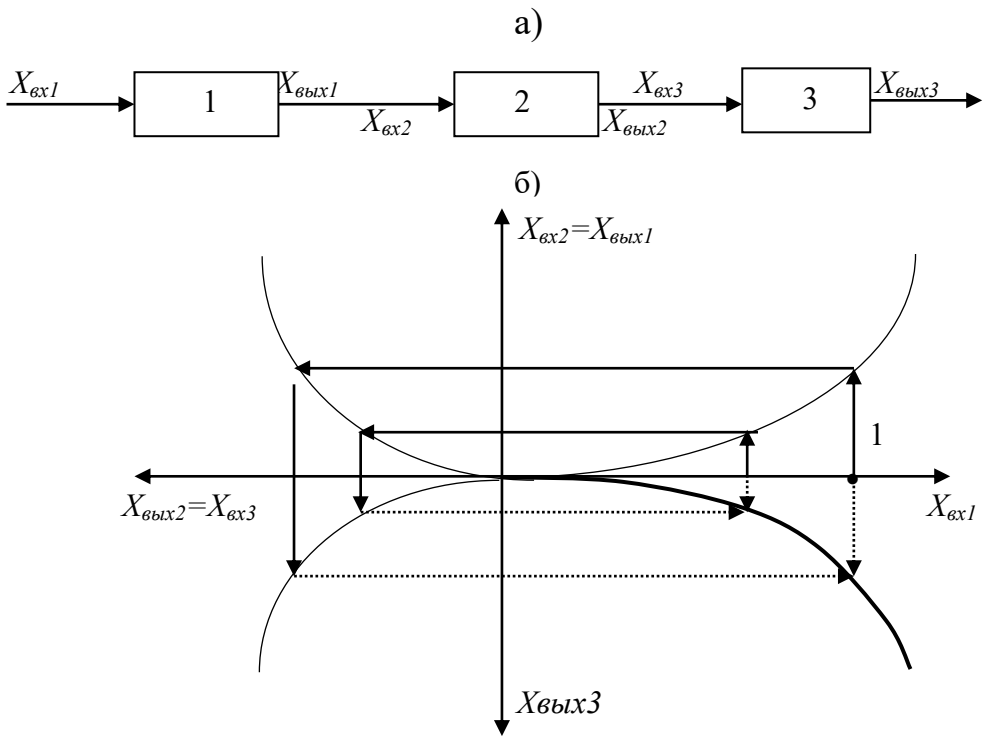

Рис.1.25. Последовательное соединение звеньев – а), построение статической характеристики системы из трех последовательно соединенных нелинейных звеньев – б).

1.3. Статика систем автоматического регулирования

В первом квадранте построена статическая характеристика $X_{вых1} = f\ (X_{вх1})$ первого звена, во втором квадранте построена характеристика второго звена, в третьем – третьего. Зададимся некоторым значением $X_{вх1}$ (точка 1), ему соответствует $X_{вых1}$, которое равно $X_{вх2}$ и т.д.

При последовательном соединении более трех звеньев сначала проводится их комбинация по три, находятся характеристики групп по три звена в каждой и аналогичным способом находится затем уже характеристика соединения.

При последовательном соединении линейных звеньев (частный случай):

$$\begin{aligned} X_{вых1} &= k_1 X_{вх1}, \\ X_{вых2} &= k_2 X_{вх2}, \\ X_{вых3} &= k_3 X_{вх3}, \end{aligned} \qquad (1.37)$$

результирующая характеристика $X_{вых3} = k_1 k_2 k_3 X_{вх1}$

Таким образом, в случае последовательного соединения линейных звеньев коэффициент передачи системы K равен произведению коэффициентов передач отдельных звеньев:

$$K = k_1 k_2 k_3 \qquad (1.38)$$

Охват звена жесткой обратной связью

Звеном с обратной связью называется такое устройство, при помощи которого часть выходного сигнала передается на вход данного звена (или одного из предыдущих звеньев).

Когда передаваемое обратной связью воздействие зависит только от выходной величины и не зависит от времени, обратная связь называется жесткой. Схема имеет вид (рис.1.26):

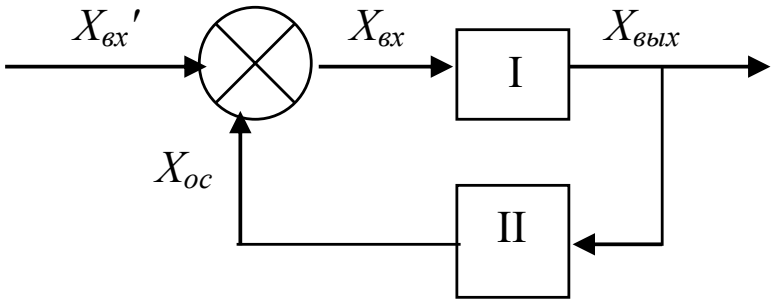

Рис.1.26. Схема звена, охваченного обратной связью:
I – охватываемое звено,
II – звено обратной связи

1.3. Статика систем автоматического регулирования

Согласно схеме: часть выходного сигнала звена I подается на его вход через звено II. Пусть статическая характеристика охватываемого звена (без обратной связи) $X_{вых} = f(X_{вх})$ и статическая характеристика обратной связи $X_{ос} = \varphi(X_{вых})$. Тогда статическая характеристика системы будет

$$X_{вых} = f\,[\,X_{вх}' \pm \varphi(X_{вых})] \qquad (1.39)$$

Знак «+– при положительной обратной связи; «–» – при отрицательной.

В системах регулирования по отклонению регулятор, подключенный к объекту, образует отрицательную обратную связь, поскольку он стремится противодействовать возмущающему воздействию.

1.3. Статика систем автоматического регулирования

На рис. 1.27 показано построение статической характеристики при отрицательной обратной связи.

В первом квадранте строится статическая характеристика охватываемого звена I, во втором- характеристика звена обратной связи II. Результирующая характеристика III строится в первом квадранте.

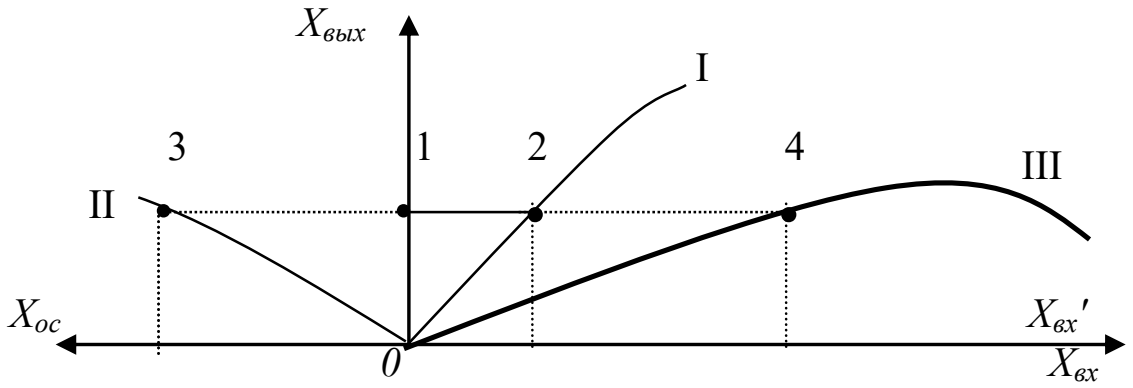

Рис. 1.27. Построение статической характеристики системы (звена), охваченного жесткой отрицательной обратной связью

Для построения статической характеристики запишем уравнение сумматора: $X_{вх} = X_{вх}' - X_{ос}$ или $X_{вх}' = X_{вх} + X_{ос}$. Отсюда вытекает и правило построения суммарной характеристики: задаемся выходной величиной системы – точка 1, по ней находим $X_{вх}$ – точка 2 и $X_{ос}$ – точка 3; к отрезку 1–2 прикладываем отрезок 2– 4, равный 1–3 – точка 4 является результирующей и т. д.

1.3. Статика систем автоматического регулирования

На рис. 1.28 показано построение статической характеристики системы при ПОС. Характеристики охватываемого I звена и звена обратной связи II рисуются в одном (первом) квадранте. Для ПОС уравнение сумматора $X_{вх} = X_{вх}' + X_{ос}$, или $X_{вх}' = X_{вх} - X_{ос}$. Отсюда почти аналогичное, как и при отрицательной обратной связи, и построение характеристики: точка 2 результирующей характеристики определяется как разность отрезков (0 – 3) минус (0 –1) и т. д.

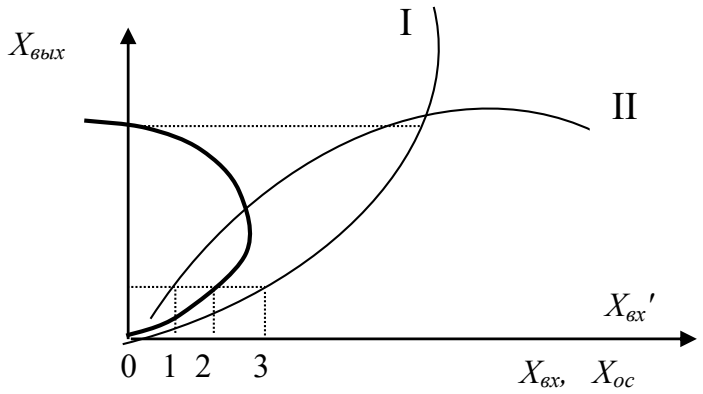

Рис.1.28. Построение статической характеристики системы (звена), охваченного жесткой положительной обратной связью

Положительная обратная связь делает результирующую характеристику более крутой, увеличивает коэффициент передачи.

Рассмотрим приведенных два случая для линейных звеньев:

$$X_{вых} = k_0 X_{вх} \text{ и } X_{ос} = k_{ос} X_{вых},$$

где k_0 – коэффициент передачи охватываемого звена.

Результирующая характеристика

$$X_{вых} = k_0 X_{вх} = k_0 (X_{вх}' \pm k_{ОС} X_{вых}).$$

$$X_{вых} = \frac{k_o}{1 \mp k_o k_{ос}} \cdot X'_{вх} \qquad (1.40)$$

1.4. Понятие об устойчивости систем автоматического регулирования

Пример 1– рис.1.29, *а*. Под действием возмущающих сил шар переместился из точки A_o в точку A_1. После действия этих сил шар вернется в точку A_o – положение шара на вогнутой плоскости устойчиво. Поскольку есть трение, то, конечно, шар вернется не точно в точку A_o, а остановится рядом. Система будет устойчивой, если она от возмущенного состояния перейдет в некоторую конечную область, окружающую невозмущенное состояние равновесия.

Здесь и далее точка A_o – невозмущенное состояние равновесия системы, точка A_1 – возмущенное состояние системы.

Пример 2 - рис.1.29, *б*. Здесь шар не вернется в свое состояние равновесия в точку А*о* – случай неустойчивого положения шара на плоскости.

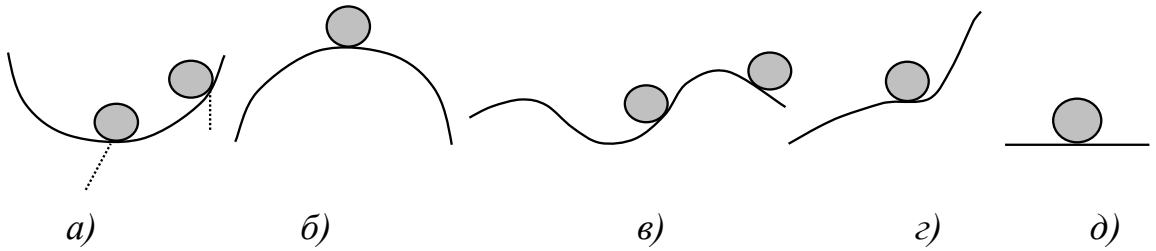

Рис. 1.29. Иллюстрация понятия устойчивости на примере плоскости и шара.

Есть и другие виды систем.

Пример 3 – рис.1.43, *в*. Система устойчива в малом, но неустойчива в большом.

Пример 4 – рис. 1.29, *г*. Полуустойчивое состояние равновесия.

Пример 5 – рис. 1.29, *д*. Безразличное состояние равновесия.

Спасибо за внимание!