

### Лекция 3

#### Структура управляющих систем. Понятие обратной связи и принципы управления. Принципы автоматического управления

В общем случае связь объекта управления с управляющим устройством производится по двум схемам: разомкнутой и замкнутой (рис 1).

Первые встречаются, как правило, в технических системах и лишь в том случае, когда нет необходимости в информации о действительных значениях управляемой величины  $Y(t)$ . Ее значения поддерживаются энергией прямого воздействия  $X(t)$  от устройства управления (УУ), а также свойствами самого объекта управления (ОУ) (рис 1, а).

Например, система числового программного управления станком переделана, на шаговый электродвигатель 1200 импульсов в соответствии с программой. При этом двигатель, как объект управления, гарантированно повернет свой ротор на 1200 дискретных углов, обеспечив необходимое перемещение рабочего органа также в соответствии с программой. Возникновение ошибки устраняется энергией электродвигателя, запас которой гарантирует отсутствие пропуска какого-либо из импульсов.

В биологических системах преобладает вторая схема, имеющая контур обратной связи выходной величины  $Y(t)$  со входом системы через измерительное устройство (ИУ) и сравнивающее устройство (СУ) (рис. 1, б).

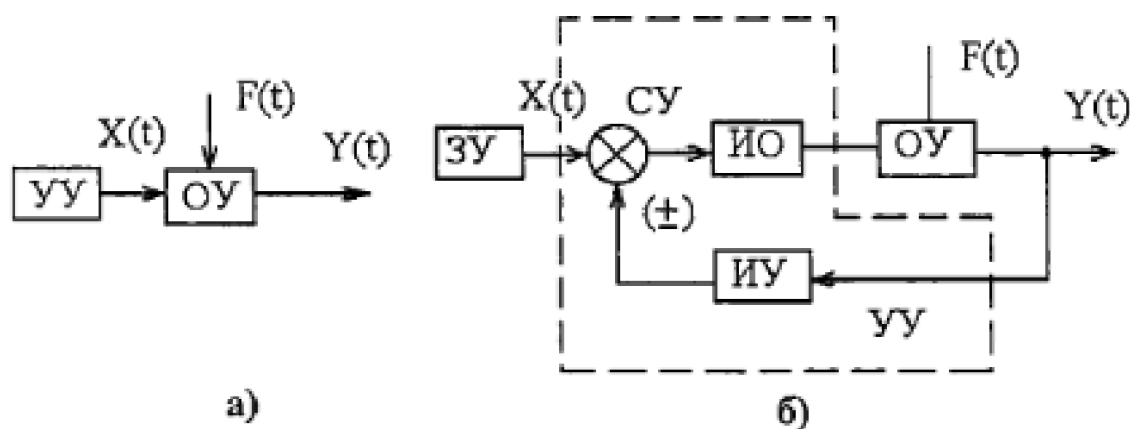


Рис. 1 – Основные схемы управляющих систем; а) разомкнутая; б) замкнутая

В таких системах, называемых замкнутыми, всегда обрабатывается информация о действительных значениях выходной величины, т.е. производится контроль исполнения алгоритма управления. В них имеется прямая линия управления от задающего устройства ЗУ через сравнивающее устройство СУ, исполнительный орган ИО к объекту управления, а также обратная линия контроля управления от выхода объекта ОУ к устройству сравнения  $Y(t) — УУ — СУ$ . Обе эти линии образуют замкнутый контур, называемый контуром обратной связи.

Элементы прямой и обратной линий, а именно СУ, ИО, ИУ представляют собой устройство управления УУ.

В биологии принято называть первую линию передачи сигнала, например от нервной системы к мышцам, «эфферентной», а второе направление от рецепторов мышц к нервным волокнам «афферентным».

### **Свойства обратной связи**

В истории техники принцип обратной связи применялся еще в 300-м г. до н. э. в греческих поплавковых регуляторах, в водных часах Ктесибиоса, масляном фонаре Филона и т.д. В дальнейшем, в России этот принцип применил И.И. Ползунов (1765 г.) в регуляторе уровня воды в паровом котле.

В электронике обратная связь была предложена Гарольдом С. Елэком а 1921 г. на фирме «Белл Лабораториэ» для улучшения качества усилителей телефонных сигналов.

Измерительные устройства (ИУ) в замкнутых системах (рис. 1, б) представлены различного вида датчиками обратной связи. В биологических системах датчиками служат различные биорецепторы и чувствительные органы. Например, рецепторы боли или давления, мышечные проприоцепторы. В других случаях «измеряемая» величина может вызывать изменение параметров в уже существующих органах. Например, таким образом, производится «измерение» температуры гипоталамусом. Встречаются такие случаи, когда «измерение» производит некий орган,

основная функция которого состоит совсем в другом. Так, в системе регуляции величины зрачка, сетчатка измеряет полный поток, что, безусловно, является ее второстепенной функцией.

Сравнивающее устройство СУ. В технических системах блок сравнения присутствует в явном виде как устройство, позволяющее вычитать одно напряжение из другого, одно давление из другого и т.д. В этом случае имеет место отрицательная обратная связь (обозначается минусом возле значка СУ, рис. 1, б).

В случае положительной обратной связи сигналы суммируются (плюс на значке СУ, рис. 1, б).

В большинстве биологических систем регулирования нет органа сравнения как самостоятельно функционирующего элемента. Его роль могут выполнять органы или клетки, реализующие функции параметрических преобразователей. Например, нейрон, у которого выходной сигнал - частота импульсов  $f_c$  зависит как от величины возбуждающего входного сигнала  $f_a$ , так и от величины тормозного входного сигнала  $f_b$ . При этом реализуется не операция вычитания сигналов, а операция деления в форме

$$f_c = \frac{f_a}{f_b} + f_0, \quad (1)$$

где  $f_0$  - частота импульсов в состоянии покоя.

В устойчивом состоянии, при неизменных  $f_a$  и  $f_b$  нейрон вырабатывает сигнал управления с частотой

$$f_c^y = K_y + f_0; \quad K_y = \frac{f_a^y}{f_b^y},$$

где индекс  $y$  обозначает установившиеся значения входного и обратного сигналов.

Сигнал ошибки начинает вырабатываться тогда, когда будут иметь место изменения во времени сигналов  $f_a$  и  $f_e$

$$\begin{cases} \Delta f_a = f_a^y - f_a^T, \\ \Delta f_e = f_e^y - f_e^T, \end{cases}$$

где  $f_a^T, f_e^T$  – текущие значения сигналов при

$$f_a^y \neq f_a^T, f_e^y - f_e^T.$$

тогда можно получить сигнал ошибки управления, продифференцирован выражение (1).

$$\Delta f_c = \left( \frac{\partial f_c}{\partial f_a} \right) \Delta f_a - \left( \frac{\partial f_c}{\partial f_e} \right) \Delta f_e = K_1 \Delta f_a - K_2 \Delta f_e,$$

где  $K_1, K_2$  - частные производные в случае нелинейных статических характеристик  $f_c = F(f_a, f_e)$ .

*Отрицательная обратная связь* обеспечивает подачу на управляемый объект со стороны управляющего устройства команд, направленных на ликвидацию рассогласования действий системы с заданной программой. Например, в живом организме повышение температуры тела ведет к расширению кожных капилляров, что способствует повышению теплоотдачи. В результате устраняется ненормальное повышение температуры.

*Положительная обратная связь* ведет не к устранению, а к усилению рассогласования. Благодаря положительной обратной связи осуществляется генерирование колебаний в различных электронных схемах, примером положительной обратной связи в организме человека может служить эпилептический припадок, когда небольшое возбуждение одного из участков коры головного мозга ведет к резкому увеличению возбудимости других участков, что приводит к возбуждению сенсорной и моторной сферы.

Обратная связь является основой саморегулирования в простых и сложных системах. Целесообразное поведение систем невозможно без обратной связи, без получения информации о степени приближения к поставленной цели. Чем сложнее организована система, тем большую роль играет обратная связь в ее взаимоуравновешивании со средой и поддержании внутренней структуры.

Регулирование на основе обратной связи используется живыми организмами как метод приспособления к условиям существования. В процессе эволюции обратные связи стали универсальным средством взаимодействия биологических систем с окружающим миром. В отличие от технических систем биологические обратные связи характеризуются нелинейностью, т.е. отсутствием прямой зависимости между выходной информацией и результатом коррекции.

Рассмотрим простой пример. Мы протягиваем руку для того, чтобы взять со стола карандаш. Движение нашей руки все время контролируется зрительным анализатором, а также кинестатическим анализатором. Информация от этих двух анализаторов поступает в мозг, где она сливается с программой достижения цели, в результате чего вырабатываются корректирующие команды. Чем ближе перемещается рука в направлении карандаша, тем сильнее влияет информация от анализаторов на деятельность эффекторов. Наконец, где-то вблизи цели чувствительность системы к сигналам обратной связи становится максимальной, и это обеспечивает точную координацию заданного движения. Другой пример: реакция зрачка на свет (чем больше световой поток, тем менее чувствительна система регулирования размеров зрачка).

Следует отметить еще одну важную особенность биологических обратных связей - это *эффект запаздывания*, На любое воздействие организм отвечает с некоторым запаздыванием (латентный период ответной реакции). Это запаздывание зависит от времени проведения импульсов по нервным путям, от времени включения гормональных механизмов и т. д. Для

линейных систем запаздывание связано с появлением колебаний, так как если компенсирующий эффект точно пропорционален возмущению, то за время, в течении которого происходит включение корректирующих механизмов, продолжающееся действие возмущающего фактора приведет к накоплению ошибок. Новая реакция системы тоже происходит с запаздыванием и снова в момент подачи корректирующей команды реакция не точно соответствует возмущению. Таким образом, возникают колебания в реакциях системы, система «самовозбуждается». Нелинейность обратных связей и «эффект упражнения» являются теми мерами, которые были выработаны эволюционно для предотвращения колебаний в системах и повышения их точности.

В живых организмах существует взаимодействие нескольких цепей обратной связи, действующих в противоположных направлениях, или обеспечивающих содружественную реакцию на различные возмущения, или выполняющих функции грубого и точного регулирования.

Понятие обратной связи имеет исключительно важное значение в кибернетике. На основе обратных связей поведение сложных систем приобретает целостность, упорядоченность и целесообразность. Н. Винер характеризует обратную связь как «свойство, позволяющее регулировать будущее поведение прошлым выполнением приказов». Учет различий между действием и его результатом - это, в конечном счете, главная сущность механизмов обратной связи, которые совершенно необходимы, если речь идет об уравнивании сложной вероятностной системы с динамичными условиями среды.

Выяснение законов обратной связи в организме, их математическое описание позволяет не только глубоко познать сущность физиологических (биологических) механизмов, но и открывает пути для воздействия на эти механизмы, а также является полезным для техники (бионика).

## Принципы автоматического управления

Рассмотрим объект управлений со всей совокупностью воздействия и сигналов, связанных с его деятельностью (рис. 2). Работой объекта ОУ управляет Система СУ, которая в свою очередь получает от задающего устройства (задатчика, программного блока и др.) воз действие  $X(t)$ .

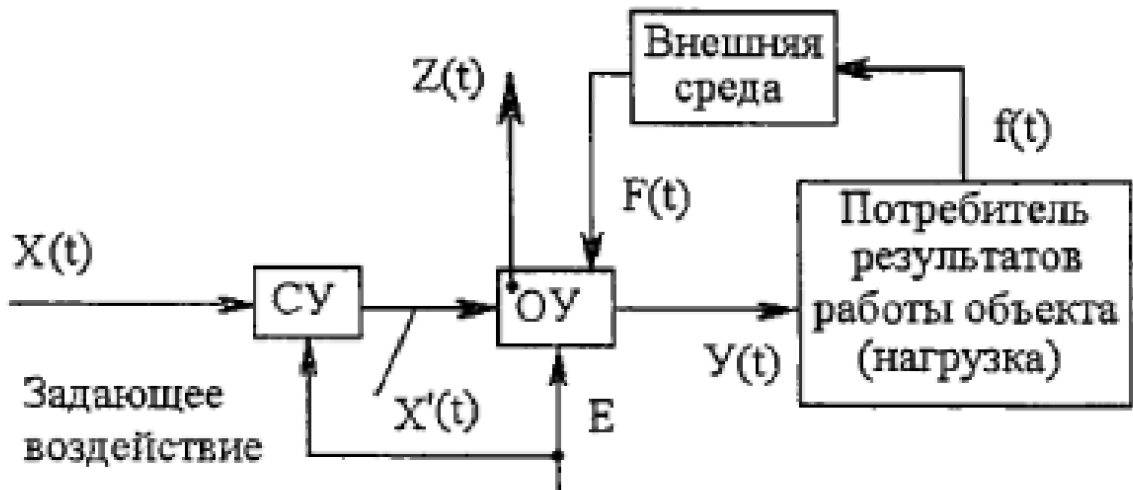


Рис. 2. Параметры, связанные с работой объекта

Система СУ преобразует первичное задающее воздействие  $X(t)$  в управляющее воздействие  $X'(t)$ . При этом элементы самой системы могут играть роль информационных, функциональных и других преобразователей. Таким образом, сигналы  $X(t)$  и  $X'(t)$  могут иметь даже разную физическую природу.

Для работы системы СУ и объекта ОУ необходима энергия  $E$ , которая может иметь также различную форму, Например, ОУ гидравлические а СУ электронная.

Объект управления вырабатывает выходные параметры  $Y(t)$ , которые поступают к каким-либо потребителям, являющимся по сути дела также элементами внешней среды по отношению к объекту ОУ. Однако внешняя среда может влиять на работу объекта возмущением  $F(t)$ , как не связанным с

работой потребителя  $F(t) \neq f(t)$ , так и связанным с результатом потребления  $F(t) = f(t)$ .

Например, турбина гидроэлектростанции вырабатывает электроэнергию напряжением  $U$ , которая поступает в городскую сеть. При этом, если изменяется нагрузка в сети, то меняется и уровень напряжения  $\Delta U$ , а изменение нагрузки  $\Delta R = f(t) = F(t)$ . Если кроме этого, во внешней среде меняется еще и мощность водяного потока, подающего на лопасти турбины, то это является дополнительным внешним возмущающим воздействием  $F(t)$ , но тогда  $\Delta R = f(t)$ , а  $F(t)$  определяется колебаниями мощности водяного потока.

Работа объекта характеризуется внутренними параметрами  $Z(t)$  (рис. 3.8), связанными с его физико-химическими свойствами. В развитых системах управления они также подвергаются контролю. Любой регулятор предназначен для создания регулирующего воздействия  $x(t)$  на объект регулирования. При этом, учитывая наличие разомкнутых и замкнутых систем управления можно выделить *три основных принципа* автоматического управления.

1. *Принцип управления по заданию.*
2. *Принцип управления по возмущению (системы автоматической коррекции).*
3. *Управление по отклонению или ошибке.*

В классической теории управления (ТАУ) первый принцип реализован в разомкнутых системах САУ или САР, Они не требуют контроля за поведением выходной величины. Пусть в резервуаре происходит смешивание жидкости и газа с образованием эмульсии (готовая продукция). Процессом управляет распределительный вал с кулачками, которые вращаются от редуктора и электродвигателя. Кулачки, в соответствии со своим профилем открывают или закрывают клапаны, через которые сжатый воздух подается в пневмокамеры управления заслонками. Последние либо



выпускают готовую эмульсию из смесителя либо закрывают ее, накапливая эмульсию, либо спускают скопившуюся на дне жидкость в дренаж. Контроль готовой продукции в этой системе отсутствует.

Принцип регулирования по возмущению в технической кибернетике иногда связывают с именем Жана Виктора Понселье (1788 -1867), Этот же принцип носит другое название «Автоматическая коррекция» (рис. 3). Эти системы также относятся к устройствам разомкнутого типа, несмотря на то, что имеют контур управления от объекта ОУ до сравнивающего устройства СУ.

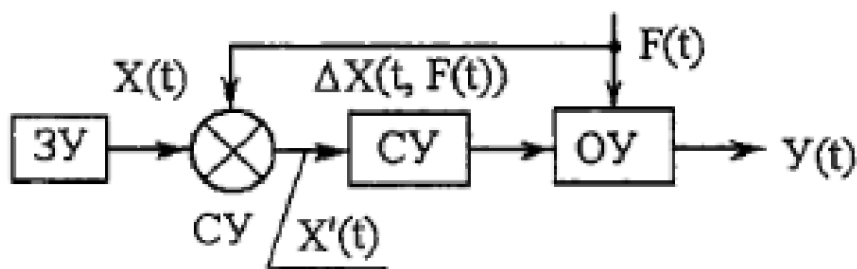


Рис. 3 –Схема САР с регулированием по возмущению

Данный контур не выполняет функций обратной связи, т.к. не контролирует выходную величину  $Y(t)$ . В этой схеме СУ выполняет не функцию сравнения двух величин, а функцию поднастройки задающего воздействия  $X(t)$  (коррекции) с учетом изменения внешнего возмущения  $F(t)$ , т.е. функцию параметрического преобразования  $X(t)$  в корректирующее воздействие  $\Delta(t, F(t))$ .

Примером может служить регулятор, скорости вращения вала электродвигателя, в котором датчиком контролируется не скорость, а крутящий момент, как внешнее возмущение. В САУ, работающих по принципу отклонения (по ошибке), контролируется сама выходная величина. В этом случае вступает в работу контур обратной связи, и ошибка управления выделяется в сравнивающем устройстве,

Биологические системы, как правило, основаны на третьем принципе автоматического управления. Сложные же технические системы, например,

системы биоэлектрического управления протезами конечностей или робототехнические системы применяют чаще всего комбинированные структуры САУ, где контролируются большинство параметров, включая  $Y(t)$ ,  $F(t)$ ,  $Z(t)$ , а также их производные, т.е. скорости, ускорения и пр.

Рассмотрим системы регулирования по отклонению и возмущению на примере упрощенной схемы терморегуляции теплокровных организмов (рис 4.).

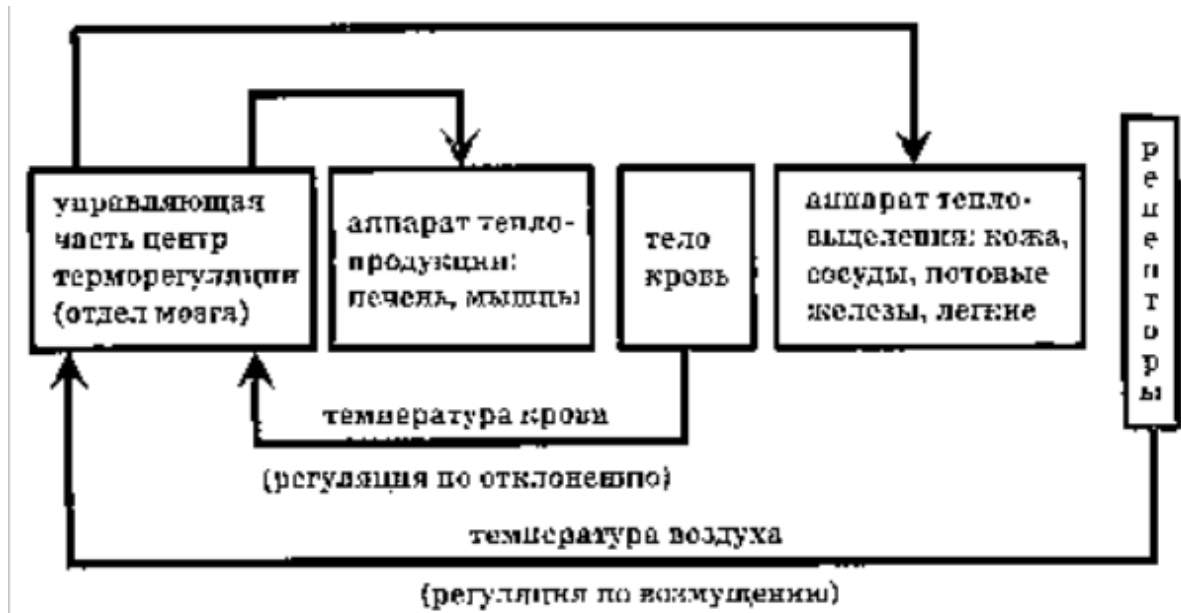


Рис. 4 – Схема терморегуляции теплокровных организмов

Информация о температуре тела организма поступает в центр терморегуляции головного мозга вместе с омывающей его кровью. При отклонении от заданной температуры вырабатываются команды в исполняющую часть для компенсации отклонения. Это регуляция по отклонению при помощи ООС. Кроме того, осуществляется регулирование по возмущению на основе сведений об изменении температуры окружающего воздуха, поступающих от кожных терморецепторов. Команды из центра терморегуляции поступают в аппарат теплопродукции (в основном тепло вырабатывает печень, мышцы) и в аппарат тепловыделения (кожа, сосуды, потовые железы, легкие).

Так, при перегреве организма уменьшается теплообразование и усиливаются процессы тепловыделения в основном посредством испарения воды с поверхности кожи и легких.