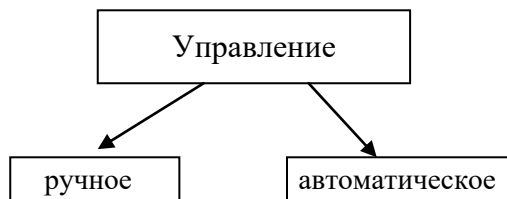


Лекции №№ 1 – 2 (17 февраля 2022)

Глава I. Основные понятия, цели и принципы автоматического управления.

1.1. Исходные положения.

Опр. Управление состоит в том, чтобы, оказывая воздействие на какое-либо устройство (объект), изменять протекающие в нем процессы для достижения определенной цели.



Если управление осуществляет человек, то такое управление называют ручным (неавтоматическим).

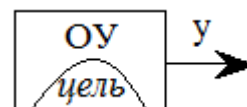
Управление называется автоматическим, если оно осуществляется без непосредственного участия человека с помощью специальных технических устройств.

Опр. Объект управления (ОУ) (или управляемый объект; для краткости просто – объект) – это техническое устройство (часть окружающего мира) или процесс, состоянием которого можно и нужно управлять.

Целью управления управляемым объектом является поддержание заданного режима.

Под заданным режимом понимается поддержание постоянной или изменение по заданному закону некоторой величины, характеризующей состояние объекта управления.

Данная величина (может быть векторной) называется управляемой или выходной переменной (величиной). Обозначается: y (\vec{y}).

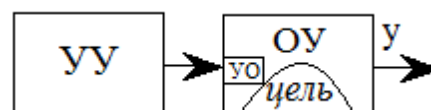


Примеры целей автоматического управления:

- поддержание постоянным напряжения или частоты в энергосистемах (управляемая величина – U или ν);
- поддержание постоянной температуры в холодильнике (управляемая величина – t);
- изменение курса самолета или корабля (управляемая величина – координаты объекта)
- и другие.

Часть объекта управления, на которую оказывают воздействие при управлении, называется управляющим (или регулирующим) органом.

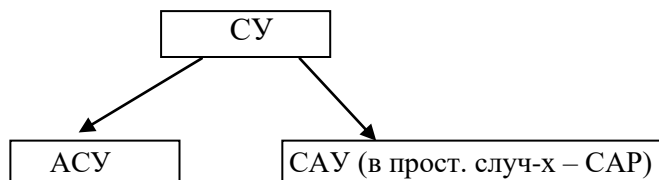
При автоматическом управлении устройство, осуществляющее управление объектом, называется управляющим устройством (УУ).



Частным случаем управления, целью которого является поддержание постоянства управляемой величины, является регулирование. При этом управляющее устройство называют регулятором.

Опр. Объект управления с взаимодействующим с ним управляющим устройством образуют систему управления.

Все системы управления делятся на два класса:



I АСУ – автоматизированные системы управления (функционирующие с участием человека (принимает решение о необходимом воздействии на объект)).

II САУ – системы автоматического управления (функционируют без непосредственного участия человека).

Простейшим видом САУ является система автоматического регулирования (САР), которая служит для поддержания постоянства управляемой величины. Однако в литературе термины «САУ» и «САР» (так же, как «регулирование» и «управление») часто применяются как синонимы.

Опр. Теория автоматического управления (ТАУ) – это научно-техническая дисциплина, в рамках которой изучаются свойства системы автоматического управления, разрабатываются принципы расчета и построения таких систем.

ТАУ является разделом кибернетики – науки об общих закономерностях процессов управления в системах не только технического характера, но и в живых организмах, экономических системах, общественных организациях (основатель кибернетики – американский ученый Норберт Винер, он же ввел этот термин).

ТАУ как самостоятельная научная дисциплина начала формироваться в 30-е годы XX века. Это было вызвано необходимостью создания автоматических регуляторов, позволяющих поддерживать постоянство или изменение по заданной программе, например, числа оборотов паровых машин, электродвигателей, температуры в печах и т.д. Появились автопилоты для самолетов и авторулевые для кораблей.

Первые регуляторы стали использоваться еще на рубеже нашей эры – арабы снабдили поплавковым регулятором уровня водяные часы для повышения их точности.

В средние века появились центробежные маятниковые уравниватели скорости хода водяных мукомольных мельниц. Здесь возникновение регуляторов было связано с необходимостью управлять процессами, подверженными очень сильным помехам (утрачивалась не только точность, но и работоспособность всей системы).

В 1675 г. Христиан Гюгенс (голландский физик, механик, математик и астроном) встроил в часы маятниковый регулятор хода.

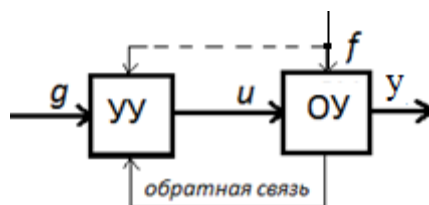
Первые промышленные регуляторы:

- 1) автоматический поплавковый регулятор питания котла паровой машины, построенный в 1765 г. Иваном Ивановичем Ползуновым (изобретатель, создатель первой в России паровой машины и первого в мире двухцилиндрового парового двигателя) и
- 2) центробежный регулятор скорости паровой машины Джеймса Уатта (англ. изобретатель, создатель универсального парового двигателя), 1784 г.

– повлекли за собой теоретические исследования, но последовавшие за ними публикации не стали основой новой науки, поскольку регуляторы рассматривались отдельно от машин (ОУ) и считались лишь вспомогательным придатком к машине.

Основоположниками ТАУ являются Иван Алексеевич Вышнеградский (русский ученый-механик и государственный деятель) и Джеймс Максвелл (англ. физик, создатель теории электромагнитного поля), написавшие в 60-х – 70-х гг. 19-го века свои фундаментальные работы о регуляторах, в которых они рассмотрели регулятор и объект регулирования как единую динамическую систему.

В общем случае блок-схему САУ можно представить следующим образом:



Выходная переменная объекта управления y является и выходной (управляемой) переменной системы управления.

Канал связи, по которому информация о текущем состоянии объекта управления (ОУ) поступает в управляющее устройство (УУ), называется обратной связью.

Внешнее воздействие g , которое определяет требуемый закон изменения выходной переменной, называется задающим воздействием.

Здесь, как это часто делают, задающее воздействие выведено за пределы управляющего устройства, в то время как оно вырабатывается входящим в состав УУ задающим устройством (задатчиком).

Как правило, на ОУ действует возмущение f – влияние внешней среды (воздействие, не зависящее от системы управления).

Возмущения делятся на: 1) нагрузка, либо 2) помеха. Бывают контролируемые и неконтролируемые.

Действие возмущений приводит к отклонению управляемой переменной от требуемого значения.

Выходная переменная управляющего устройства, являющаяся входной переменной объекта управления, называется управляющим воздействием. Обозначается: u .

Объекты управления в зависимости от реакции на внешние воздействия (u / f) делятся: устойчивые, неустойчивые, нейтральные.

Опр. Объект называется устойчивым, если после кратковременного внешнего воздействия он с течением времени возвращается к исходному состоянию. Т.е. при малом изменении u или f на короткий интервал времени:

$$u^0 \rightarrow u = u^0 + \Delta u \rightarrow u = u^0$$

$$(\text{или } f^0 \rightarrow f = f^0 + \Delta f \rightarrow f = f^0) \quad (\Delta u, \Delta f - \text{малы})$$

выходная переменная с течением времени примет первоначальное значение $y = y^0$:
 $y(t) \rightarrow y^0$ при $t \rightarrow \infty$.

Более строгое определение устойчивости будет в главе V.

Если переменная y после кратковременного внешнего воздействия принимает новое постоянное значение ($y(t) \rightarrow y^* \neq y^0$ при $t \rightarrow \infty$), то объект называется нейтральным.

Если переменная y не стремится к первоначальному или новому постоянному значению (т.е. продолжает изменяться), как бы мало ни было внешнее воздействие, то объект называется неустойчивым.

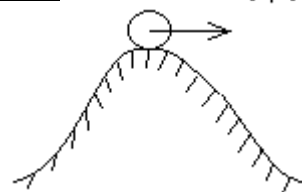
Для устойчивого ОУ механической аналогией является шарик, находящийся в лунке, который может быть смещен при внешнем воздействии, однако возвращается обратно при окончании воздействия:



для нейтрального ОУ – шарик на горизонтальной плоскости:

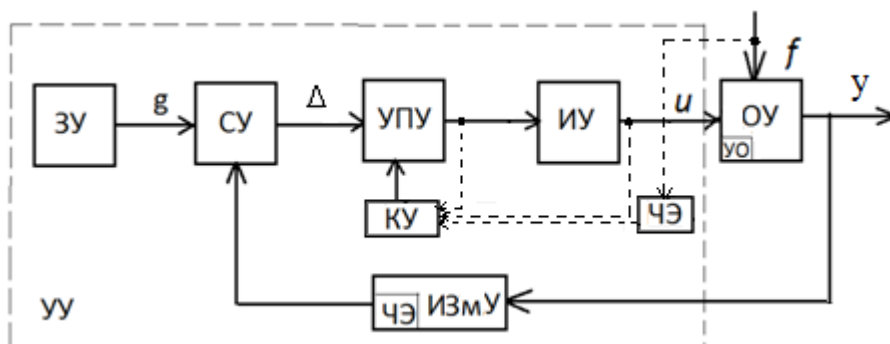


для неустойчивого ОУ – шарик на вершине холма (продолжает удаляться от положения равновесия):



1.2. Функциональная схема САУ.

Опр. Функциональная схема САУ – это схема, в которой каждому функциональному элементу системы соответствует определенное звено (т.е. элемент).



! САУ включает в себя УУ и ОУ.

Структура УУ зависит от принципа управления.

Элементы функциональной схемы:

1) ОУ – объект управления (включает в себя управляющий орган – УО).

Остальное – управляющее устройство (УУ).

2) ИЗМУ – измерительное устройство. Его назначением является измерение действительного значения управляемой переменной (осуществляется ЧЭ – чувствительным элементом, который также измеряет возмущения) и преобразование управляемой величины в величину, вообще говоря, иной физической природы, удобную для дальнейшего использования.

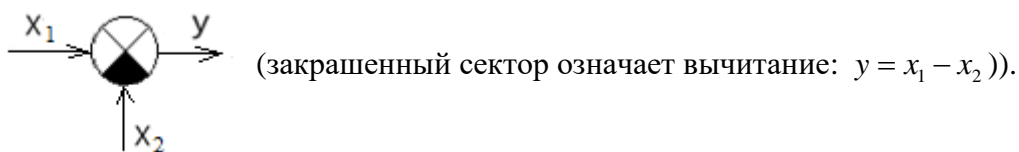
3) ЗУ – задающее устройство (задатчик). Вырабатывает задающее воздействие (изменяемое по какому-либо закону или постоянное).

Как и измерительное устройство, ЗУ часто является преобразователем: величина на выходе ЗУ должна быть одинаковой природы с величиной на выходе измерительного устройства.

4) СУ – сравнивающее устройство. Его назначением является сопоставление значения управляемой величины с её заданным значением (и следовательно, выявление отклонения управляемой величины от заданного значения – ошибки Δ).

Поэтому иногда СУ называют датчиком ошибки (датчиком отклонения/рассогласования).

СУ обычно осуществляет операцию вычитания величин (на схеме обозначается так:



Иногда устройства 2) – 4) совмещены.

5) УПУ – усилительно-преобразовательное устройство. Предназначено для усиления мощности сигнала ошибки. В простейших САУ может отсутствовать.

В САУ используются электронные, магнитные и гидравлические усилители.

6) ИУ – исполнительное устройство – воздействует на управляющий орган объекта (пример ИУ: двигатель в следящей системе).

При разработке и исследовании алгоритмов управления обычно ИУ и другие элементы, обладающие инерционностью, объединяют с объектом управления.

Иногда в состав исполнительного устройства входит исполнительный механизм (рычаг, передача) который в ряде САУ отсутствует, а воздействие на объект осуществляется изменением какой-либо величины (без помощи механических устройств).

7) КУ – корректирующее устройство. Применяется для придания системе определенных динамических свойств.

КУ могут быть включены по-разному.

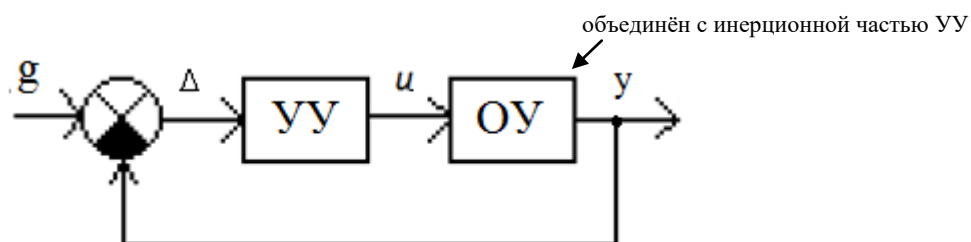
Часто КУ используется для формирования управляющих воздействий, зависящих от возмущений f .

! В ряде САУ те или иные функциональные устройства совмещены или отсутствуют.

Элементы САУ, как правило, обладают свойством однонаправленности: *элемент не оказывает обратной реакции на предшествующие элементы (т.е. не изменяет их состояния)*.

Если хотя бы один элемент в САУ является однонаправленным, то САУ также является однонаправленной. В конечном итоге такая САУ реагирует на отклонение управляемой переменной от заданного значения (т.е. на ошибку).

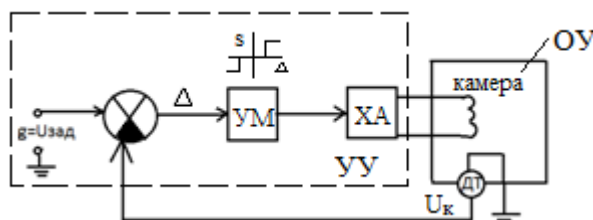
Блок-схема замкнутой САУ:



Пример. Система стабилизации температуры в холодильнике.

Задача (цель) данной САУ состоит в стабилизации температуры в камере холодильника при изменении массы и температуры закладываемых продуктов (или при открывании дверей).

Упрощенная функциональная схема системы стабилизации температуры:



Здесь $U_{зад}$ — задающее воздействие (g) — напряжение, соответствующее заданной температуре.

УМ — усилитель мощности с релейной характеристикой, который используется в качестве управляющего устройства (УУ). Он включает или отключает холодильный агрегат (ХА), «прокачивающий» хладагент через трубки камеры.

ДТ — датчик температуры. U_k — напряжение с датчика температуры (выходной сигнал ДТ, пропорционален температуре камеры) — выходная переменная САУ (y).

Δ — разница между заданной (низкой) и действительной (повышенной) температурами (ошибка).

Как правило, в холодильнике не применяются операционные усилители, сравнение заданной и действ. температур происходит непосредственно → на схеме используется сумматор —

Возмущение (f) – количество тепла в закладываемом продукте.

Состояние – температура внутри камеры.

Схема работает следующим образом: если открыть камеру и положить некоторую массу теплых продуктов, то сразу повышается температура в камере $\rightarrow |\Delta| \uparrow \rightarrow$ включается УМ (при достижении некоторого порогового значения ошибки) и работает ХА \rightarrow через некоторое время разница между заданной и действительной температурами (Δ) становится меньше порогового значения \rightarrow реле отключается.

Такая система работает только «в одну сторону» – на охлаждение.

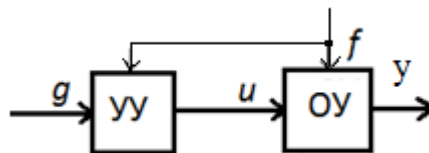
1.3. Принципы автоматического управления.

Существуют различные принципы управления, представляющие собой способы организации управления.

I. Регулирование по возмущению (или принцип компенсации, или принцип Понселé – по имени французского инженера Жана Виктора Понселé, предложившего в 1830 г. принцип регулирования паровой машины по моменту сопротивления на ее валу, т.е. по возмущению)

– это такой способ управления, при котором измеряются действующие на объект возмущения и на их основе вырабатывается управляющее воздействие, компенсирующее влияние возмущений.

Функциональная схема системы регулирования по возмущению имеет следующий вид:



y – управляемая (выходная) переменная,

g – задающее воздействие (внешнее воздействие, определяющее требуемый закон изменения управляемой переменной),

f – возмущение (влияние внешней среды на ОУ),

u – управляющее воздействие (управление).

Действие возмущения приводит к отклонению управляемой переменной y от требуемого значения g (появляется ошибка $\Delta = g - y$).

В системах с данным принципом управления управляющее воздействие подбирается таким образом, чтобы в установившемся режиме отклонение отсутствовало ($\Delta = 0$).

Например, если в статике объект управления описывается уравнением

$$y = K_u \cdot u - K_f \cdot f ,$$

то, выбирая управление $u = \underset{\text{некот. ф-ция}}{F(f)} = \frac{g + K_f \cdot f}{K_u}$,

получим: $y = g + K_f \cdot f - K_f \cdot f = g$ (т.е. $\Delta = 0$).

Достоинства принципа регулирования по возмущению:

- 1) Принципиальная возможность полной компенсации возмущения.
- 2) Управление по возмущению реализуется в разомкнутой системе, поэтому отсутствует проблема обеспечения устойчивости таких систем (система всегда устойчива при устойчивом объекте управления).
- 3) Быстрота реакции на изменение возмущения.

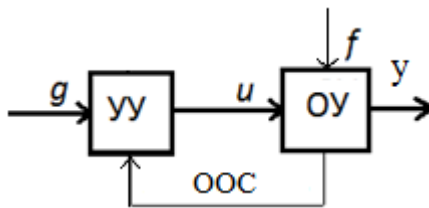
Недостатки:

- 1) Принцип неприменим, если возмущение f является неконтролируемым (не может быть измерено). Кроме того, этот принцип нельзя использовать (из-за несоответствия между g и y), если математическое описание объекта недостаточно точное, а также если объект является нейтральным или неустойчивым.
- 2) Управление по возмущению может учесть только действие контролируемых возмущений, поэтому оно менее точное (по сравнению с управлением по отклонению).
- 3) Для учета нескольких возмущений требуется несколько компенсирующих цепей, а это увеличивает сложность системы (и уменьшает ее надежность).

II. Принцип регулирования по отклонению (принцип обратной связи или принцип Ползунова-Уатта)

– это такой способ управления, при котором определяется отклонение текущего значения выходной переменной от требуемого значения и на его основе вырабатывается управляющее воздействие.

Управление по отклонению реализуется в замкнутой системе управления (системе с отрицательной обратной связью), *функциональная схема* которой имеет вид:



В устройстве управления систем, реализующих данный принцип, сравниваются две величины: $g(t)$ и $y(t)$ – и вырабатывается такое управляющее воздействие $u(t)$, которое будет обеспечивать минимальное значение отклонения (ошибки):

$$\Delta(t) = g(t) - y(t) \rightarrow \min$$

Первыми промышленными регуляторами, построенными по принципу обратной связи, были регулятор уровня жидкости в котле паровой машины Ивана Ивановича Ползунова¹ (1765 г.) и регулятор угловой скорости паровой машины Джеймса Уатта (1784 г.). Поэтому данный принцип иногда называют принципом Ползунова-Уатта².

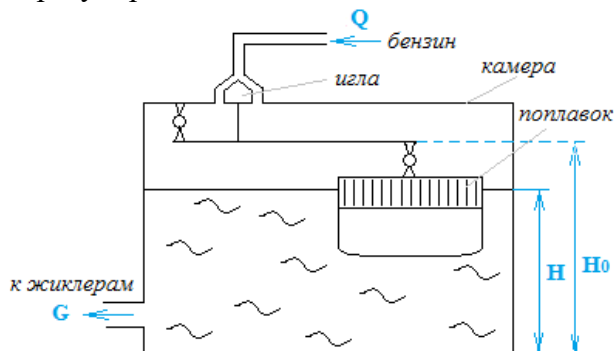
¹ русский изобретатель-теплотехник, создатель первой в России паросиловой установки.

² шотландский инженер, изобретатель-механик. Ввел первую единицу мощности — лошадиную силу. Его именем названа единица мощности — Ватт.

Примеры САУ, работающих по данному принципу:

- 1) **САР температуры в холодильнике** (см. выше).
- 2) **Поплавковый регулятор уровня бензина.**

Наиболее распространенным современным регулятором уровня является *поплавковый регулятор уровня бензина*, устанавливаемый в карбюраторе¹ автомобильных двигателей. В нем реализован способ регулирования по отклонению.



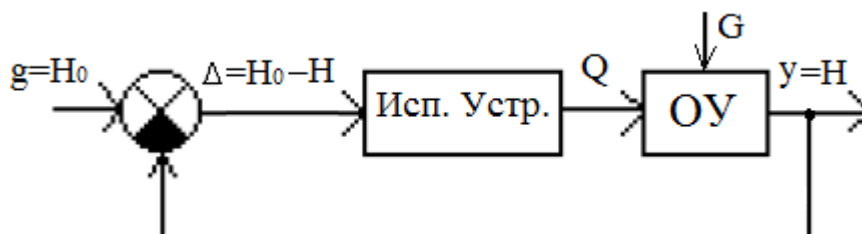
Объектом управления является камера, в которой уровень бензина H ($= y$) непосредственно измеряется положением поплавка. Системой рычагов с поплавком связана игла, регулирующая приток бензина Q ($= u$) в камеру.

Задача заключается в поддержании требуемого уровня H_0 ($= g$).

При уровне $H = H_0$ игла полностью закрывает канал притока бензина, т.е. $Q = 0$.

G – расход бензина, поступающего к жиклерам двигателя (внешнее неконтролируемое воздействие) ($= f$). Этот расход приводит к уменьшению уровня бензина в камере.

Функциональная схема поплавкового регулятора имеет вид:



Элементы данной функциональной схемы:

ОУ – камера (ОУ совмещен с измерительным устройством – поплавком).

H – выходная величина – уровень бензина,

H_0 – задающее воздействие – требуемый уровень бензина,

Исп. Устр. – исполнительное устройство – представляет собой канал притока бензина, задающий величину Q (управление). Исп. устройство управляется изменением положения поплавка и перемещением иглы.

Принцип регулирования по отклонению широко используется не только в технике. Он также присущ живым организмам и обществу. Например:

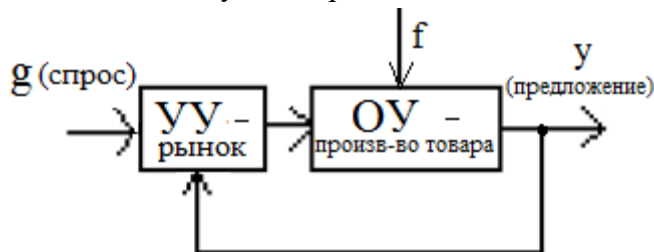
¹ **Карбюратор** – прибор для приготовления горючей смеси из легкого жидкого топлива и воздуха для питания карбюраторных двигателей внутреннего сгорания.

Жиклёр – деталь с калиброванным отверстием для дозирования расхода жидкости / газа.

3) Системы регуляции температуры живых организмов функционируют по данному принципу.

4) Рыночная экономика

– представляет собой систему управления, в которой регулятором, работающем по принципу обратной связи, является рынок. Рынок определяет дисбаланс между предложением и спросом и воздействует на производство того или иного товара:



Достоинства принципа обратной связи:

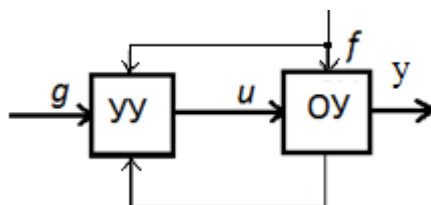
- 1) Универсальность: возможность использования в условиях отсутствия информации о возмущениях. (Действительно, при реализации данного принципа не надо знать, какие возмущения действуют на объект и чем вызвано отклонение управляемой переменной от требуемого значения.)
- 2) Замкнутые системы позволяют получить более высокую точность, чем разомкнутые.

Недостатки:

- 1) Система может стать неустойчивой при устойчивом объекте. (Для замкнутых систем существует проблема противоречия между точностью и устойчивостью системы: увеличение точности может привести к неустойчивости системы.)
- 2) Принципиальная невозможность полной компенсации возмущений. Это связано с тем, что при данном способе управления управляющее воздействие начинает вырабатываться только после того, как возмущение, начав действовать, вызывает отклонение управляемой величины от требуемого значения. Т.е. принцип предполагает, что ошибка в системе допускается.

III. Принцип комбинированного управления (управление по возмущению и отклонению).

Функциональная схема системы с комбинированным управлением:



Принцип комбинированного управления используется, например, в тех случаях, когда на объект действует много возмущений, одно (или несколько) из которых оказывают наибольшее влияние и может быть измерено. В подобных случаях влияние преобладающего возмущения можно нейтрализовать, используя принцип компенсации, и нейтрализовать влияние остальных возмущений, используя принцип обратной связи.

Комбинированные регуляторы объединяют достоинства обоих рассмотренных выше принципов: быстроту реакции на изменение возмущения и высокую точность регулирования независимо от того, какая причина вызвала отклонение управляемой величины от требуемого значения.

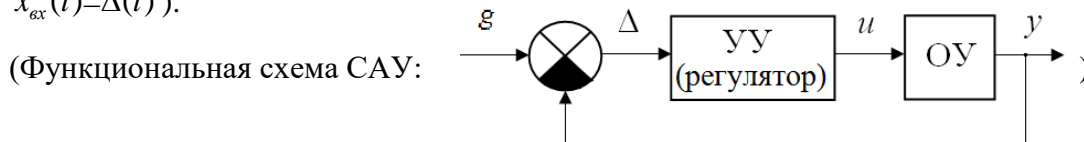
1.4. Типовые законы управления.

Опр. Законом управления (или алгоритмом управления) называется зависимость выходной величины $u(t)$ управляющего устройства от входной $x_{\text{вх}}(t)$:

$$u = F(x_{\text{вх}}),$$

где $x_{\text{вх}}(t)$ – может быть задающим воздействием ($g(t)$), возмущением ($f(t)$) или ошибкой ($\Delta(t)$) в зависимости от принципа управления.

Рассмотрим типовые законы управления, реализуемые регуляторами по отклонению (т.е. $x_{\text{вх}}(t) = \Delta(t)$).



1) Пропорциональный закон (обозначается: П-закон; соответствующий регулятор – пропорциональный регулятор или П-регулятор):

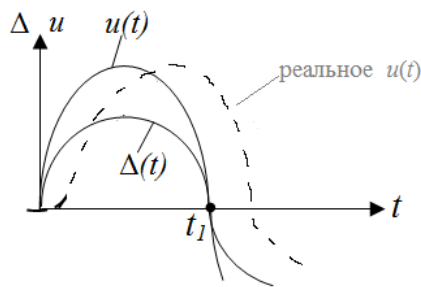
$$u(t) = K_{\text{П}} \cdot \Delta(t),$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент усиления регулятора.

Достоинства закона: простота, высокое быстродействие.

Недостаток: нельзя получить высокую точность.

Действительно, при пропорциональном управлении которое имеет, например, следующий вид:

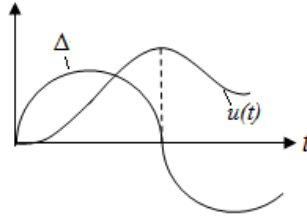


из-за инерционности элементов управляющего устройства (усилителей, исполнительных устройств и т.д.) управляющее воздействие в своем изменении будет запаздывать (пунктирная кривая) по отношению к изменению Δ . Поэтому в момент времени t_1 , когда ошибка станет равной нулю, управляющее воздействие будет продолжать действовать в прежнем направлении, вынуждая ошибку вновь увеличиваться, изменив знак. В результате процесс в системе может стать слишком колебательным и даже расходящимся.

2) Интегральный закон (И-закон; соответствующий регулятор – И-регулятор)

$$u(t) = \frac{K_{II}}{T_I} \int_0^t \Delta(t) dt,$$

где константа T_I называется постоянной времени интегрирования (имеет размерность времени).



Достоинства регулятора:

Интегральный регулятор — астатический (т.е. статическая ошибка с таким регулятором = 0) → высокая точность (т.к. после окончания переходного процесса при $\Delta = 0$ управляющее воздействие может сохраниться).

Недостаток: применение интегрального управления снижает быстродействие системы (в т.ч. быстродействие ниже, чем у системы с П-регулятором), а также приводит к ухудшению устойчивости (последнее будет показано в гл. 5).

Быстродействие И-регулятора ниже, чем у П-регулятора, т.к. величина управляющего взаимодействия (интеграла) в некоторый момент времени пропорциональна соответствующей площади под кривой $\Delta(t)$. Поэтому при возникновении ошибки управляющее воздействие накапливается постепенно, запаздывая по отношению к изменению ошибки).

3) Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон, изодромное управление; соответствующий регулятор — ПИ-регулятор):

$$u(t) = K_P \cdot \Delta(t) + K_I \cdot \int_0^t \Delta(t) dt$$

(Здесь K_P — коэффициент усиления пропорциональной части регулятора, K_I — коэффициент усиления интегральной части регулятора.)

Сочетает в себе высокую точность интегрального управления (так же, как и И-регулятор, обеспечивает астатическое регулирование) с большим быстродействием пропорционального управления.

В первые моменты времени при появлении ошибки система с таким законом управления работает как система пропорционального управления. В дальнейшем — как система интегрального управления, т.к. с течением времени преобладающее значение начинает приобретать второе слагаемое.

4) Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон; соответствующий регулятор — ПИД-регулятор):

$$u(t) = K_P \cdot \Delta(t) + K_I \cdot \int_0^t \Delta(t) dt + T_D \cdot \frac{d\Delta(t)}{dt}, \quad (*)$$

где T_D — постоянная времени дифференцирования.

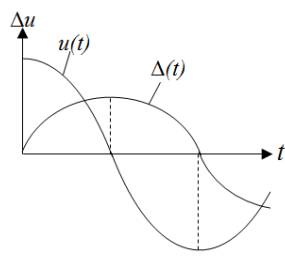
Достоинства:

1. ПИД-регулятор так же, как и И-регулятор (и ПИ-регулятор), обеспечивает астатическое регулирование.
2. Повышенное быстродействие.
3. Производная $\frac{d\Delta}{dt}$ вводится в закон регулирования для повышения качества процесса регулирования (т.к. управление с ПИД-регулятором (за счет управления по производной) позволяет учитывать не только наличие ошибки, но и скорость её изменения).

Дифференциальный закон управления (управление по производной):

$$u(t) = T_d \cdot \frac{d\Delta(t)}{dt}$$

– управляющее устройство реагирует не на саму ошибку, а на скорость её изменения:



и поэтому действует с упреждением, стремясь не допустить появления ошибки.

Однако самостоятельного значения управление по производной не имеет, т.к. в установившемся режиме, когда ошибка постоянна, производная от ошибки равна нулю и управление прекращается.

Третье слагаемое в (*) играет роль в переходных процессах, а с течением времени система начинает работать как система интегрального управления (т.е. преобладающее значение приобретает второе слагаемое).

В алгоритме управления:

интеграл от ошибки – для улучшения точности,

производная ошибки – для улучшения динамических свойств САУ.