МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»
СТАХАНОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»
для студентов направления подготовки
Профессиональное обучение (по отраслям),

профили «Электроснабжение», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд»

Стаханов 2024

УДК 681.51.01

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
(ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»)

(протокол №___от_________ 2024 г.)

Конспект лекций по дисциплине «**Теория автоматического управления»** для студентов направления подготовки Профессиональное обучение (по отраслям), профили «Электроснабжение», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд». Сост.: А.Г. Петров, Е.Н. Шелемей. – **Стаханов**: ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 2024. – 31 с.

Конспект лекций содержат минимальный объём теоретических сведений, необходимых для изучения дисциплины.

Предназначены для студентов направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профили «Электроснабжение», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд».

Составители: Петров А.Г.
Шелемей Е.Н.

Ответственный за выпуск: Петров А.Г.
Рецензент: Сафонов В.И.

Содержание

Введение

Развитие современных средств измерительной и вычислительной техники привело к широкому применению систем автоматического управления в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Теория автоматического управления (ТАУ) является отраслью науки, которая рассматривает принципы построения систем автоматического управления и методы исследования процессов в этих системах.

Развитие ТАУ началось в период промышленной революции. Сначала это направление в науке разрабатывалось механиками для решения задач регулирования, т.е. поддержания заданного значения частоты вращения, температуры, давления в паровых машинах. Отсюда происходит название теория автоматического регулирования.

Система автоматического регулирования называют совокупность устройств, взаимодействующих в процессе работы элементов, предназначенных для поддержания значения регулируемой величины в заданных пределах. Позднее выяснилось, что принципы управления можно применять не только в технике, но и в биологии, экономике. Процессы управления и обработка информации в системах любой природы изучает кибернетика. Один из ее разделов, связанных с техническими системами, называется ТАУ. Теория управления является более общим термином, чем термин регулирование.

Объектом изучения ТАУ является автоматическая система управления. Предметом изучения ТАУ являются процессы, происходящие в автоматической системе управления. Целью дисциплины «Теория автоматического управления» является изучение принципов построения систем автоматического управления, изучение модели объектов во временной и частотной областях, методов анализа устойчивости линейных систем, оценки качеств процессов управления.

ЛЕКЦИЯ 1.
Сущность автоматического управления и определения понятий

План:
1. Назначение, актуальность, и сегодняшняя роль ТАУ
2. Объект управления и воздействия
3. Задачи теории автоматического управления

1.1. Назначение, актуальность, и сегодняшняя роль ТАУ.

Теория автоматического управления изучает общие принципы построения автоматических систем и методы их исследования независимо от физической природы процессов, происходящих в них. ТАУ является теоретической базой автоматических систем в различных областях техники. Она дает основную теоретическую базу для исследования и проектирования любых автоматических и автоматизированных систем во всех областях техники и народного хозяйства. ТАУ изучает процессы управления и задачи создания любых систем с обратной связью.

В 20 век в условиях технической и информационной революций, освобождающих людей от выполнения рутинных. Монотонных и тяжелых видов труда, любое производство насыщено средствами механизации и автоматизации. Поэтому в процессе работы инженеру любой специальности приходится участвовать в проектировании, расчете, исследовании системы автоматического регулирования или эксплуатировать объекты, оборудованными такими автоматическими устройствами.

В начале ТАУ создавалось для изучения статистики и динамики процессов автоматического управления объектами – производственными, энергетическими, транспортными и т.п. Основное ее значение сохранилось в наше время.

Деятельность и разные виды операций

В русском языке термин «управление» охватывает весьма широкий круг понятий, включающий: верховное правление государством, управление государственной территориальной единицей, отраслью народного хозяйства, предприятием, учреждением, цехом, в общем любым производственным процессом.

Целенаправленную деятельность человека для удовлетворения различных потребностей можно разделить на два класса операций: рабочие операции и операции управления.

К рабочим операциям относят действия непосредственно необходимые для выполнения процесса в соответствии с природными законами, которыми определяется ход процесса (вращение вала двигателя, снятие стружки)

Замену труда человека в рабочих операциях называют механизацией, цель которой освобождение человека от тяжелых операций, вредных операций, монотонных.

Управление объектом – это процесс воздействия на него с целью обеспечения требуемого течения процессов в объекте или требуемого изменения его состояния.

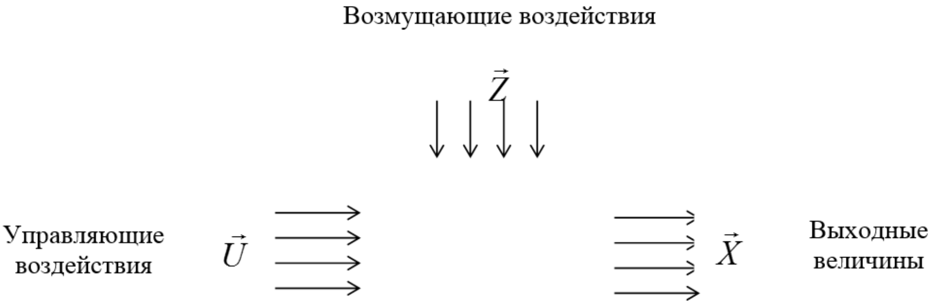
Операции управления – обеспечивают в нужные процессы времени начало, порядок следования и прекращение отдельных операций, заданием нужных параметров самому процессу.

Совокупность управляющих операций образует процесс управления. Оно может включать такие операции, как контроль за правильностью работы устройств, обеспечение безотказности, пуск и остановка, включение резервных вспомогательных устройств, обеспечение требуемых вспомогательных параметров, характеризующих управляемый производственный процесс.

Замену труда человека в операциях управления называют автоматизацией, а технические устройства, выполняющие операции управления – автоматическими устройствами. Выполнение всех операций по управлению без непосредственного участия человека называется автоматическим управлением, а система реализующая его – системой автоматического управления (САУ).

Система, в которой автоматизирована только часть управленческих операций, а другая их часть (обычно наиболее ответственная) выполняется людьми, называется автоматизированной системой управления (АСУ).

1.2. Объект управления и воздействия



Объект управления – совокупность технических средств – машин, орудий труда, средств механизации, выполняющие данный процесс.

Внешняя среда реально оказывает на каждый объект управления многочисленные воздействия, и если бы объект обладал «конструктивной жесткостью» и «динамической прочностью» (выполнение функций с требуемой точностью, несмотря на инерционные свойства и неизбежные помехи), потребности в автоматическом регулировании не возникает.

Все воздействие на объект учесть практически невозможно, поэтому в поле зрения остаются лишь те, которые оказывают наибольшее влияние на выходные величины и называют их входными воздействиями. Входные воздействия с точки зрения их влияния на действия объекта, на его выходные величины разделяют на две принципиальные группы. Те, которые обеспечивают желаемое изменение поведения объекта, называют управляющими. При их отсутствии задача управления вообще не имеет решения. При ручном управлении воздействие на объект организует оператор, а при автоматическом – управляющее устройство. Те воздействия, которые мешают достижению цели, и изменить их, как правило, невозможно, называют возмущающими.

Задача управления, по существу заключается в формировании такого закона изменения управляющих воздействий, при котором достигается желаемое поведение объекта независимо от наличия возмущений.

1.3. задачи теории автоматического управления

Основными задачами ТАУ являются исследования статических и динамических свойств автоматических систем и разработка систем, удовлетворяющих заданным техническим требованиям.

В ТАУ исследуется две основные задачи:

анализ систем автоматического управления

синтез систем автоматического управления.

Первая из них, задача анализа, состоит в исследовании процесса работы определенной системы автоматического управления с заданной структурой и элементами при различных параметрах элементов и различных видах воздействий на систему. В задачу анализа входит исследование устойчивости систем, исследование динамических и статических отклонений, происходящих при процессах управления.

Вторая задача, синтез, является более сложной и состоит в построении системы автоматического управления; в нее входит выбор схемы управляющего устройства, его элементов и их параметров.

Теоретически любую САР можно рассматривать как систему преобразования задающих и возмущающих сигналов в сигнал выходных величин.

Пусть $X = (x_1, x_2 \ldots, x_n)$ – совокупность управляемых координат процесса (выходных величин) , $Z = (z_1, z_2 \ldots, z_n)$ – возмущающие воздействия, $U = (u_1, u_2 \ldots, u_n)$ – управляющие воздействия.

Величины X, U, Z в зависимости от природы объекта связаны различными математическими зависимостями. В общем случае

$$X = W(Z,U), \qquad (1)$$

где W– оператор, определяющий вид зависимости.

Задача анализа: Заданы Z,U и W и требуется найти X. Это обычно пассивная задача, здесь требуется осуществить лишь X без вмешательства в ход процесса.

Задача синтеза: Носит активный характер. – заданы U,Z и желаемый вид X, требуется найти такой W, чтобы удовлетворить требование к X.

Синтез активного управления: Заданы W и желаемый вид X. Требуется найти такое U, чтобы X удовлетворила поставленным требованиям.

Задачи линейной ТАР:

Сложная и разносторонняя задача управления, в подавляющем большинстве случаев, включает узкую задачу регулирования. Так как автоматическое регулирование в настоящие время имеет практическое значение, поэтому мы будем рассматривать в дальнейшем ее.

Любой производственный процесс характеризуется рядом показателей – регулируемых параметров.

Автоматическое обеспечение требуемых значений регулируемых параметров, определяющих ход производственного процесса в объекте регулирования по заранее заданному закону, называется автоматическим регулированием, которое обеспечивается системой автоматического регулирования (САР).Раздел ТАУ, занимающийся этим называется ТАР. В нашем курсе «Основы теории автоматического управления» мы будем касаться следующих задач ТАР.

Измерение динамических свойств и характеристик различных типов звеньев автоматических систем любой физической природы и конструкции;

Формирование функциональных и структурных схем систем автоматического управления и регулирования;

Построение динамических характеристик этих систем;

Определение ошибок и показателей точности замкнутых систем;

Исследование устойчивости замкнутых систем;

Оценка качественных показателей процессов управления;

Определение чувственности систем к изменению параметров и других факторов;

Изучение различных видов корректирующих устройств, вводимых в системы для повышения точности и улучшения динамических качеств.

Создание частотных, корневых и других методов синтеза корректирующих устройств и различных методов оптимизации систем по показателям качества

ЛЕКЦИЯ 2.
Назначение и принципы построения систем автоматического регулирования (САР)

План:

1. Принципы построения САР (фундаментальные принципы управления)
2. Регулирование по возмущению (компенсации)и по отклонению
3. Принцип адаптации и комбинированное регулирование

2.1 Принципы построения САР (Фундаментальные принципы управления)

В самих названиях кроется назначение, различия видны из вида задающей функции.

Стабилизирующая автоматическая система управления – это система, предназначенная поддерживать постоянным какой–либо параметр объекта.

Программная автоматическая система предназначена изменять значение управляемой величины в соответствии с заранее известной функцией времени (хотя может менять другие параметры).

Следящая автоматическая система предназначена для изменения управляемой величины в соответствии с изменением другой величины, которая действует на входе системы и закон изменения которой заранее неизвестен.

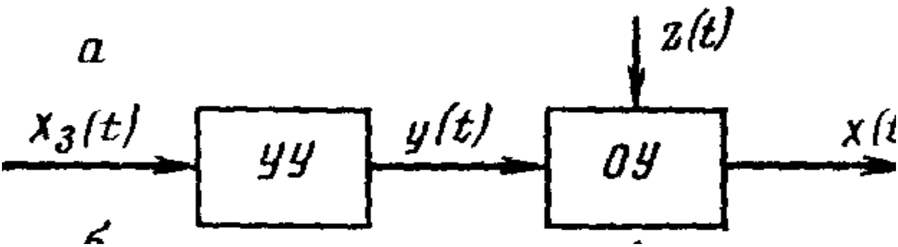
В стабилизирующих, программных и следящих системах цель управления заключается в обеспечении равенства или близости управляемой величины ее заданному значению, осуществляемое поддержанием x(t) ≈xз(t), называется регулированием.

Принцип автоматического регулирования определяет, как и на основе какой информации формируется управляющее воздействие. Одним из основных признаков, характеризующих принцип регулирования, является рабочая информация, необходимая для выработки управления воздействия и структура цепи передачи воздействий в системе.

Принцип разомкнутого управления

Сущность принципа заключается в том, что алгоритм управления вырабатывается только на основе алгоритма функционирования и не контролируется другими факторами–возмущениями или выходными координатами процесса. Функциональная схема показана ниже

Близость X и Xo обеспечивается только конструкцией и подбором физических закономерностей, действующих в элементах. Несмотря на очевидные недостатки принцип используется довольно широко. Элементы, входящие в разомкнутую цепь входит в состав любой системы, поэтому принцип представляется настолько простым, что его не всегда выделяют как один из фундаментальных принципов.

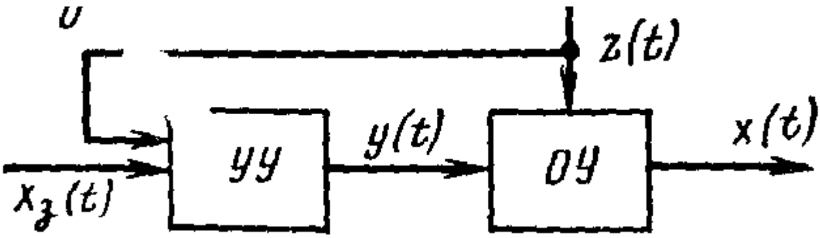


x3(t) – задает алгоритм функционирования.

К элементам разомкнутого типа можно отнести:

логические элементы и, или, не, датчики программы и сам программный механизм, т.е. устройство пуска и, например, программированный кулачковый механизм счетно – решающие элементы.

2.2. Регулирование по возмущению (компенсации)и по отклонению



Состоит в том, что из различных возмущений, действующих в системе, выбирается одно главное, на которое реагирует САР. В этом случае компенсируется внешнее влияние на регулируемый параметр только основного возмущающего воздействия, и управляющее воздействие вырабатывается в системе в зависимости от результатов изменения основного возмущения, действующего на объект.

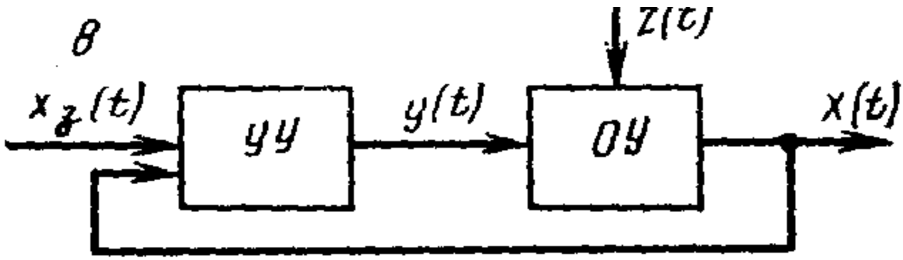
Недостатки:

Применение ограничено объектами, характеристики которых известны.

Поскольку система, по сути, разомкнутая, появляются отклонения управляемой величины с изменением характеристик объекта и элементов системы

Устраняются воздействия, по которым созданы компенсационные каналы.

Принцип регулирования по отклонению (принцип Ползувова–Уатта)



Достоинства:

1) Уменьшает отклонение регулируемой величины не зависимо от факторов вызвавших это отклонение.

2) Менее чувствителен к изменениям параметров элементов системы по сравнению с разомкнутыми системами.

Недостатки:

1) В простых одноконтурных системах нельзя достичь абсолютной инверсности.

2) Возникает проблема устойчивости.

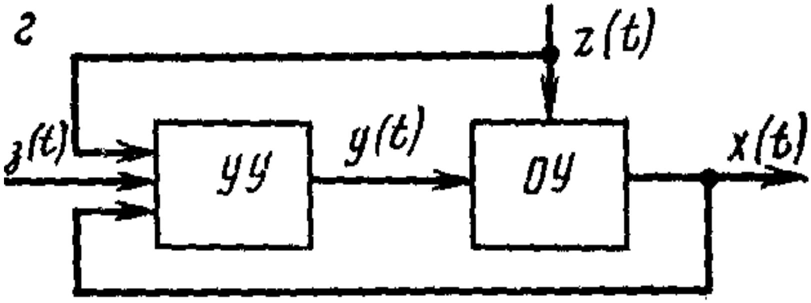
Управляющее (регулирующее) воздействие вырабатывается на основании разности регулируемой и задаваемой величин. Единственным образом заданная связь называется главной. Регулируемый параметр через главную обратную связь подается на вход регулятора с обратным знаком по отношению к q(t). Поэтому главная связь считается отрицательной.

Отрицательная черта замкнутой системы ее универсальность. Любое отклонение регулируемого параметра от заданного значения вызывает появление управляющего воздействия независимо от числа, вида и места приложения возмущений.

В системах, работающих по принципу отклонения для формирования управляющего воздействия необходимо наличие ошибки. Само по себе это является недостатком, так как именно ошибку требуется изменить регулятором. При управлении сложными инерционными объектами, когда управляющее воздействие не может вызвать мгновенного изменения регулируемого параметра, возникающая ошибка может иметь недопустимо большое значение.

2.3. Принцип адаптации и комбинированное регулирование

Каждый из рассмотренных выше примеров имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому для создания автоматических систем высокой точности обычно используют принцип комбинированного регулирования, сочетающий в себе оба принципа.



В комбинированной системе внешнее воздействие компенсируется регулирующим воздействием в соответствии с его изменением, а воздействие по отклонению используется для устранения погрешностей, возникающих в результате неточности регулирования.

Принципы адаптации (приспособление) используется в самонастраивающихся САР. Особенностью их является то, что они автоматически приспосабливаются к изменяющимся условиям работы и автоматически выбирают оптимальный закон регулирования. Рассмотренные ранее САР с неизменной настройкой регулируемого параметра, в которых процесс регулирования сводится к ликвидации отклонения, не могут обеспечить нормальную работу объекта регулирования, если его статические и динамические характеристики изменяются во времени. В таких случаях необходимо изменить или настройки регулятора, или характеристики и параметры отдельных элементов системы, или схему элементов, или даже вводить в действие новые элементы.

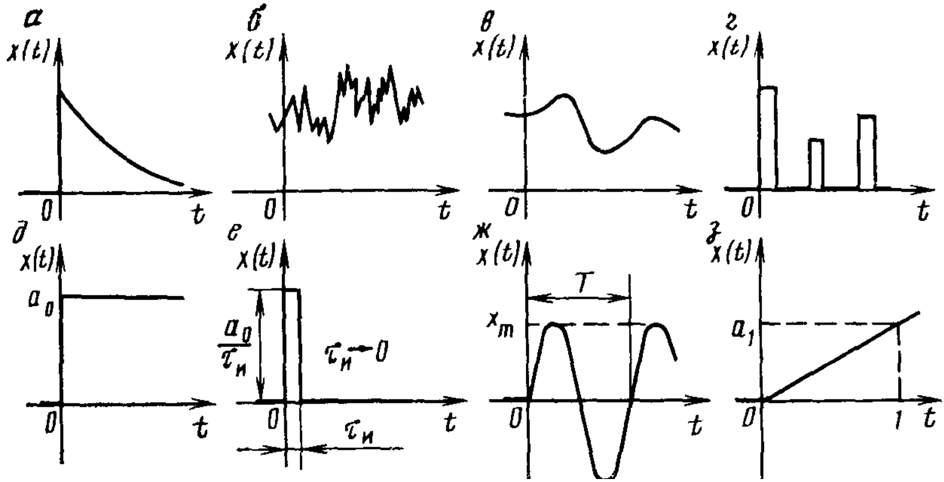
ЛЕКЦИЯ 3.
Типовые входные воздействия и характеристики звеньев

План:

1. Воздействие и их виды.
2. Временные и частотные характеристики
3. Типовые соединения элементов и их характеристики

3.1 Воздействие и их виды.

Как отмечалось выше, САР имеет место управляющие (задающие) и возмущающие воздействия, в результате действия которых в системе возникает переходной процесс, приводящий систему к новому установившемуся состоянию. В реальных условиях воздействия могут иметь произвольный характер. Для исследования динамических свойств элементов и систем выбирают такие типовые воздействия, которые по возможности близко отражали бы наиболее существенные особенности реальных воздействий. Такими воздействиями могут быть либо наиболее вероятные, либо наиболее неблагоприятные воздействия. Причем их можно разделить на регулярные и случайные, непрерывные и дискретные.



Для анализа выбраны типовые воздействия наиболее полно и иллюстративно показывающие особенности выбранных звеньев. В качестве типовых приняты ступенчатое, гармоническое, линейно возрастающее.

Единичный скачок может возникнуть при мгновенном замыкании или размыкании сети постоянного тока, вызванном приложением или сбросом нагрузки.

Единичное ступенчатое воздействие

$$1(t) = \begin{cases} 0 & при\ t < 0 \\ 1 & при\ t > 0 \end{cases}.$$

Единичное импульсное воздействие

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & при\ t \neq 0 \\ \infty & при\ t = 0 \end{cases} \text{так, что} \int_{\infty}^{-\infty} \delta(t)dt = 1.$$

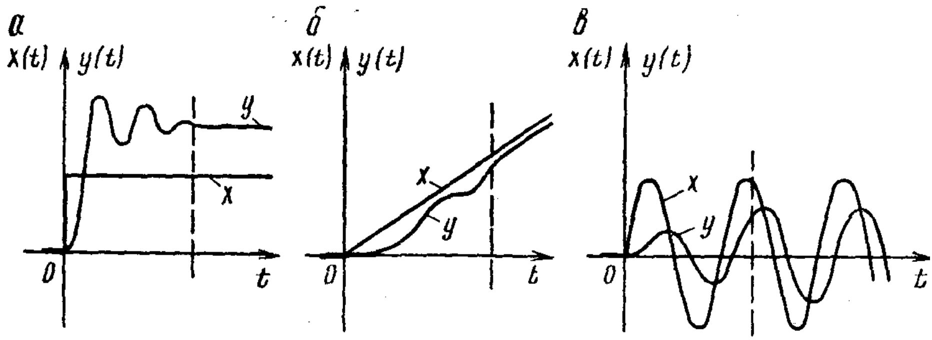
Гармоническим воздействием называют функцию, изменяющуюся по закону синуса или косинуса. Оно используется при анализе динамических свойств САР частотными методами. Частотный метод заключается в построении частотных характеристик.

$x(t) = \mathbf{1}(t)\, x_m \sin\omega t.$

Для следящих и программных систем типовым является линейное воздействие

$x(t) = \mathbf{1}(t)\, at.$

Режимы перехода САУ из одного состояния к другому показаны на рисунке.



3.2. Временные и частотные характеристики

Наглядное представление о свойствах звена дает функция, являющаяся решением дифференциального уравнения. Но одно и то же дифуравнение может иметь множество решений, конкретный вид которых зависит от начальных условий и от характера функции, задающей воздействие. Поэтому принято динамические свойства элементов систем характеризовать решением, соответствующим нулевым начальным условиям и одному из типовых воздействий, рассмотренных выше. Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его переходная характеристика.

Переходной характеристикой h(t) называют изменение выходной величины, возникающее после подачи на вход скачкообразного изменения входной величины при нулевых начальных условиях.

Импульсной переходной характеристикой w(t) называют изменение выходной величины, возникающее после подачи на вход дельта–функции при нулевых начальных условиях.

Импульсная переходная характеристика равна производной от переходной характеристики

w(t) = dh(t)/dt,

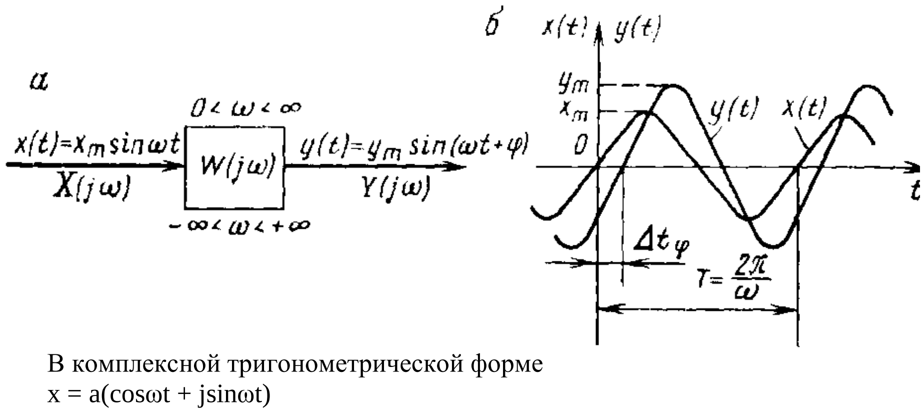
и наоборот, переходная характеристика равна интегралу от импульсной переходной характеристики.

$$h(t) = \int_0^t w(\upsilon)d\upsilon$$

Переходные характеристики и называют также временными.

Частотные характеристики

Частотными характеристиками называются зависимости, связывающие входную и выходную величины линейной системы в установившемся режиме, когда входное воздействие изменяется по гармоническому закону x(t) = a sinwt с частотой и постоянной амплитудой a. На выходе системы после завершения переходного процесса устанавливается синусоидальные колебания y(t) = b sin(wt + φ) . На комплексной плоскости входная и выходная величин для каждого момента времени t определены векторами a и b.



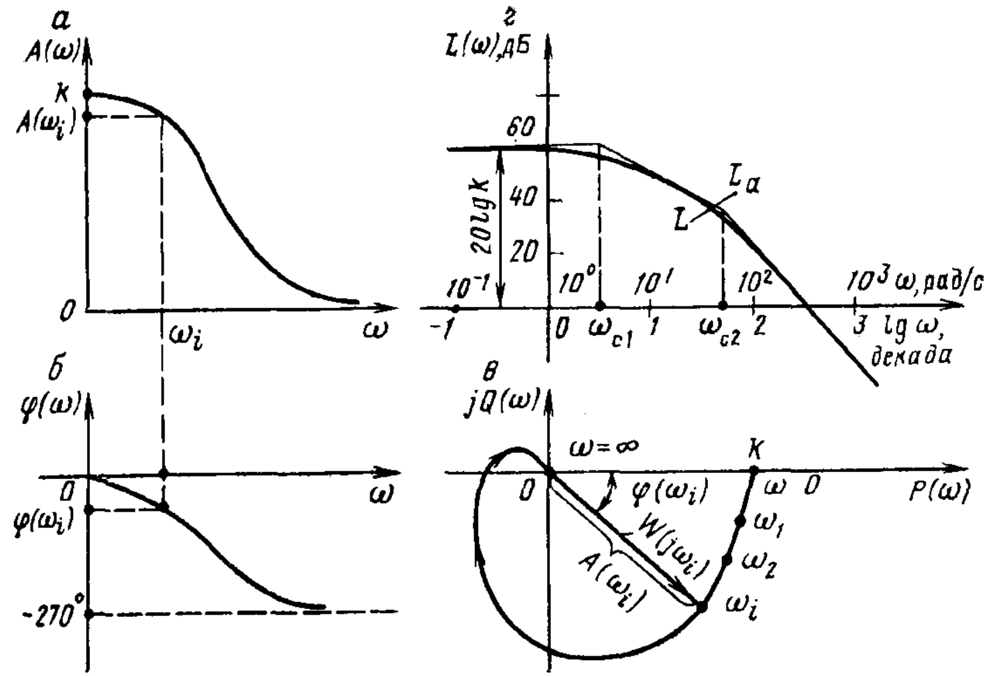
В комплексной тригонометрической форме

$x = a(\cos\omega t + j\sin\omega t)$

$y = b[\cos(\omega t + \varphi) + j\sin(\omega t + \varphi)]$.

Используя формулу Эйлера $e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t$, получим

$x(t) = ae^{j\omega t}$; $y(t) = be^{j(\omega t+\varphi)}$.



Если амплитуду колебаний входной величины оставить неизменной, а изменять частоту w от нуля до ∞, то каждому значению частоты будут соответствовать определенные значения амплитуды колебаний b и сдвига фазы φ на выходе системы. Это значит, что отношение амплитуд и разность фаз являются функциями частоты, т.е:

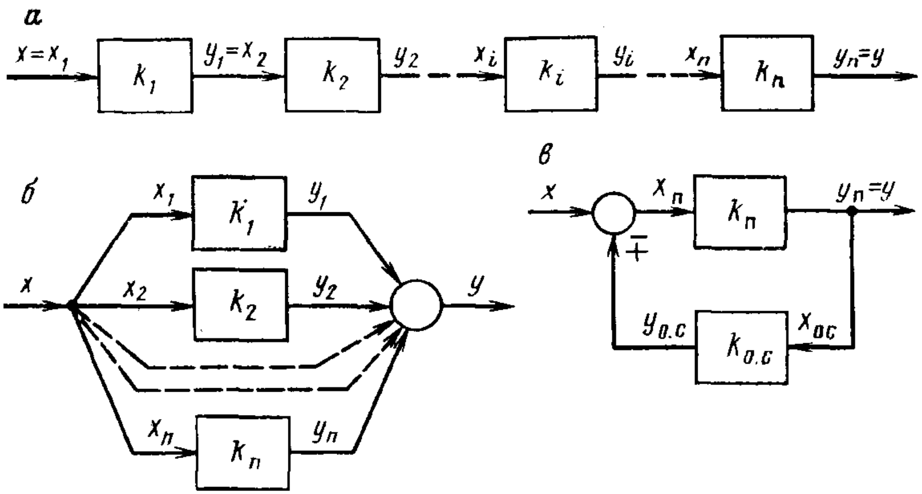
$$b/a = A(w);\ \varphi = \varphi(w).$$

Рассмотренные выше временные, передаточные и частотные характеристики однозначно связаны меду собой прямым и обратным преобразованиями Лапласа и Фурье. Это отражено в таблице.

Таблица. Взаимные соответствия динамических характеристик.

Характер–ки	h(t)	w(t)	W(p)	W(jω)
Переходная h(t)=	1	$\int_0^t w(\vartheta)d\vartheta$	$L^{-1}\{W(p)/p\}$	$F^{-1}\{W(j\omega)/ j\omega\}$
Импульсная w(t)=	dh(t)/dt	1	$L^{-1}\{W(p)\}$	$F^{-1}\{W(j\omega)\}$
Передаточная W(p)=	pL{h(t)}	L{w(t)}	1	$W(j\omega)\mid_{p=j\omega}$
Частотная W(jω)=	jωF{h(t)}	F{w(t)}	$W(p)\mid_{p=j\omega}$	1

3.3. Типовые соединения элементов и их характеристики



Алгоритмическая структура любой САУ представляет собой комбинацию трех типовых соединений звеньев; последовательного, параллельного и встречно–параллельного (охват обратной связью), как показано на рисунке.

Последовательным соединением называют такое соединение, в котором выходная величина каждого предыдущего элемента является входным воздействием для последующего элемента. Поскольку для каждого i–го элемента уравнения статики запишется

$y_i = k_i y_{i-1},$ ()

то общий коэффициент передачи последовательно соединенных звеньев равен произведению их передаточных коэффициентов

$$k_э = \prod_{i=1}^{n} k_i . \qquad ()$$

Соответственно эквивалентная передаточная функция последовательного соединения из n звеньев равна произведению n передаточных функций звеньев

$$W_э(p) = \prod_{i=1}^{n} W_i(p). \qquad ()$$

Параллельным соединением называют такое соединение, при котором на вход всех звеньев поступает одно и то же воздействие, а их выходные величины суммируются. Согласно этому определению

$x = x_1 = \ldots = x_i = \ldots = x_n,$ ()

$y = y_1 + \ldots + y_i + \ldots + y_n,$ ()

$y_i = k_i x_i,$ ()

то общий коэффициент передачи параллельно соединенных звеньев равен сумме их передаточных коэффициентов

$$k_э = \sum_{i=1}^{n} k_i . \qquad ()$$

Соответственно эквивалентная передаточная функция параллельного соединения из n звеньев равна сумме n передаточных функций звеньев

$$W_э(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p). \qquad ()$$

Встречно–параллельным соединением двух звеньев (соединением с обратной связью) называют такое соединение, при котором выходной сигнал первого звена поступает на вход второго, а выходной сигнал второго элемента суммируется с общим входным сигналом. Первое звено называется звеном прямой цепи, а второй элемент – звеном обратной связи. В зависимости от знака сигнала обратной различают положительные и отрицательные обратные связи. Согласно определению понятия обратной связи можно записать уравнения:

прямой связи

$y_П = k_П x_П$, ()

обратной связи

$y_{о.с.} = k_{о.с} y$, ()

и узла суммирования

$$x_П = x \mp y_{о.с.}. \qquad ()$$

Подставляя, получаем уравнение статики соединений с обратной связью

$$y = x \frac{k_П}{1 \pm k_П k_{о.с.}}. \qquad ()$$

Отсюда получим

$$k_Э = \frac{k_П}{1 \pm k_П k_{О.С.}}. \qquad ()$$

общий коэффициент передачи звена, охваченного обратной связью, равен коэффициенту прямой цепи, разделенному на единицу плюс произведение коэффициентов прямой и обратной связи.

Причем знак «+» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «–» – положительной.

Соответственно эквивалентная передаточная функция соединения с обратной связью равна

$$W_э(p) = \frac{W_П(p)}{1 \pm W_П(p) W_{О.С.}(p)} \qquad ()$$

Где знак «+» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «–» – положительной.

ЛЕКЦИЯ 4.
Типовые звенья и их характеристики

План:

1. Общее описания и свойства
2. Переходные характеристики.
3. Безынерционные звенья–проработать самостоятельно

4.1. Общее описания и свойства

Типовые звенья описываются уравнением
$a_0y''(t) + a_1y'(t) + a_2y(t) = b_0x'(t) + b_1x(t).$ (1)
Принято приводить уравнение звена к стандартному виду в символической записи:

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)y = k\,(\tau\ p + 1)x\ , \qquad (2)$$

где $T_2^2 = a_0/a_2$; $T_1 = a_1/a_2$; $\tau = b_0/b_1$ – постоянные времени; $k = b_1/a_2$.
Вспомним, как можно получить характеристики звеньев:
–статические, приравнивая производные по времени к нулю,
–динамические:
$W(p) = R(p) /Q(p) = k(\tau p+1)/(T_2^2p^2 + T_1p + 1)$, (2)
$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$, (2)

4.2. Переходные характеристики – проработать самостоятельно

Для получения переходной характеристики h(t) ищется общее решение, состоящее из двух частей. Импульсная характеристика является производной по времени от переходной характеристики w(t) = dh(t)/dt.

Из общего вида уравнения или передаточной функции можно сделать некоторые выводы о свойствах звеньев. Если коэффициенты a_2и b_1 не равны нулю, то такие звенья называются статическими или позиционными, что говорит о наличии уравнения статики. В противном случае звенья являются астатическими n–го порядка, где n – это степень при операторе дифференцирования, характеризующего астатизм звена или системы.

4.3. Безынерционные звенья–проработать самостоятельно.

Ряд звеньев называются элементарными, а именно безынерционные, идеально дифференцирующие и идеально интегрирующие.

ЛЕКЦИЯ 5.
Устойчивость систем управления

План:

1. Понятие, виды и общее условие устойчивости
2. Алгебраические критерии устойчивости
3. Формулировка критерия Нейквиста

5.1. Понятие, виды и общее условие устойчивости

Одной из важнейших характеристик автоматической системы управления наряду с точностью является устойчивость. Причем, если показатели точности определяют степень полезности и эффективности системы, то от устойчивости зависит работоспособность системы. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из центральных в теории автоматического управления.

Раскроем физический смысл понятия «устойчивость». Устойчивость автоматической системы – это свойство системы возвращаться в исходное состояние равновесия после прекращения воздействия, выведшего систему из этого состояния. Неустойчивая система не возвращается в исходное состояние, а непрерывно удаляется от него.

Неустойчивость автоматических систем управления возникает, как правило, из–за неправильного или очень сильного действия главной обратной связи. Неправильное действие главной обратной связи имеет место обычно в тех случаях, когда из–за ошибки, допущенной при монтаже системы, связь оказывается положительной (вместо отрицательной), что практически при любых параметрах делает систему неустойчивой. Возникающую при этом неустойчивость называют статической.

Более сложным и более распространенным видом неустойчивости является динамическая неустойчивость. Она проявляется системах с отрицательной обратной связью, при достаточно большом значении передаточного коэффициента разомкнутого контура и при количестве инерционных звеньев, не меньшем трех. Причиной динамической неустойчивости обычно является значительная инерционность элементов замкнутого контура, из–за которой в режиме колебаний системы сигнал главной обратной связи значительно отстает от входного сигнала и оказывается с ним в фазе. Это означает, что связь, выполненная конструктивно как отрицательная (в статическом режиме!), в динамике (в режиме гармонических колебаний) проявляется на определенной частоте как положительная.

Рассмотрим математическую сущность устойчивости и неустойчивости. Согласно данному выше физическому определению устойчивость зависит только от характера свободного движения системы. Свободное движение линейной или линеаризованной системы описывается однородным дифференциальным уравнением

$$a_0\, x^{(n)}(t) + a_{n-1}\, x^{(n-1)}(t) + \ldots + a_{n-1}\, x'(t) + a_n\, x(t) = 0. \qquad (4.1)$$

где $x(t) = x_C(t)$ – свободная составляющая выходной величины системы.

Вынужденная составляющая выходной величины, зависящая от вида внешнего воздействия и правой части дифференциального уравнения, на устойчивость системы не влияет.

Дадим математическое определение понятия «устойчивость». Система является устойчивой, если свободная составляющая $x_C(t)$ переходного процесса с течением времени стремится к нулю, т. е. если

$$\lim_{t \to \infty} x_c(t) = 0, \tag{4.2}$$

а если свободная составляющая неограниченно возрастает, т. е. если

$$\lim_{t \to \infty} x_c(t) = \infty, \tag{4.3}$$

то система неустойчива. Наконец, если свободная составляющая не стремится ни к нулю, ни к бесконечности, то система находится на границе устойчивости.

Очевидно, что при этом выходная величина системы будет стремиться к вынужденной составляющей, определяемой внешним воздействием и правой частью уравнения. Такую устойчивость принято называть асимптотической.

Найдем общее условие, при котором система, описываемая уравнением (8.1), устойчива. Решение уравнения равно сумме

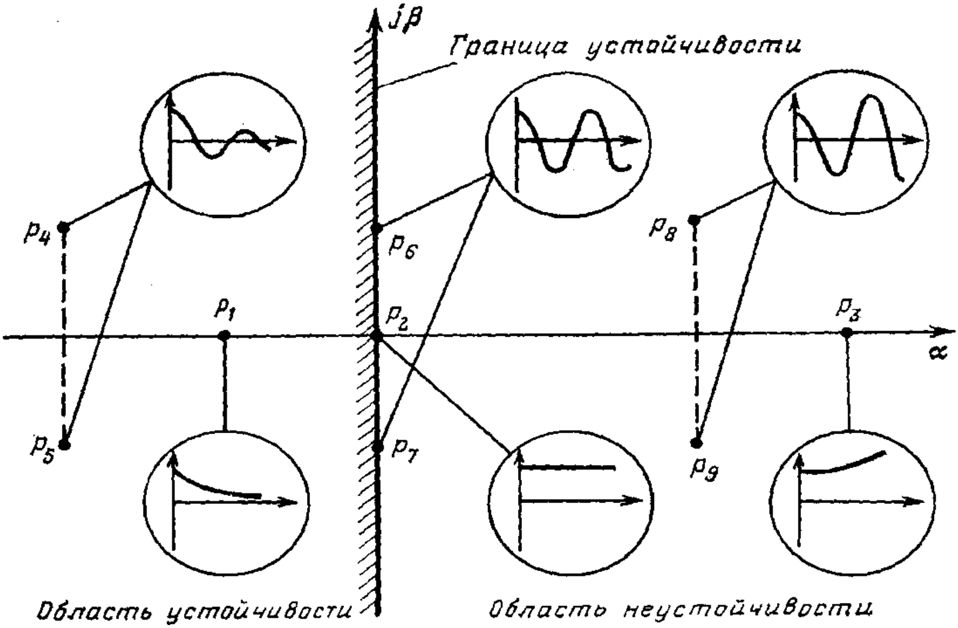
$$x_c(t) = \sum_{k=1}^{n} C_k e^{p_k t}, \tag{4.4}$$

где C_k – постоянные, зависящие от начальных условий; p_k – корни характеристического уравнения

$$a_0 p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n = 0. \tag{4.5}$$

Корни характеристического уравнения могут быть действительными ($p_k=\alpha_k$), мнимыми ($p_k= j\beta_k$) и комплексными $p_k= \alpha_k+ j\beta_k$, причем комплексные корни всегда попарно сопряжены между собой: если есть корень с положительной мнимой частью, то обязательно существует корень с такой же по модулю, но отрицательной мнимой частью.

Переходная составляющая (8.4) при $t\to\infty$стремится к нулю лишь в том случае, если каждое слагаемое вида $C_k e^{\alpha kt} \to 0$. Характер этой функции времени зависит от вида корня p_k. Рассмотрим все возможные случаи расположения корней p_k на комплексной плоскости и соответствующие им функции $x_k(t)$, которые показаны внутри кругов (как на экране осциллографа).



Влияние корней характеристического уравнения системы на составляющие ее свободного движения

1. Каждому действительному корню $p_k = \alpha_k$ в решении (8.4) соответствует слагаемое вида

$x_k(t) = C_k e^{\alpha kt}$. (4.6)

Если $\alpha_k < 0$ (корень p_1), то функция (8.6) при $t \to \infty$ стремится к нулю. Если $\alpha_k > 0$ (корень p_3), то функция неограниченно возрастаег. Если $\alpha_k = 0$ (корень p_2), то эта функция остается постоянной.

2. Каждой паре сопряженных комплексных корней $p_k = \alpha_k + j\beta_k$ и $p_k = \alpha_k - j\beta_k$ в решении (8.4) соответствуют два слагаемых, которые могут быть объединены в одно слагаемое

$x_k(t) = C_k e^{\alpha kt} \sin(\beta_k t + \varphi_k)$. (4.7)

Функция (8.7) представляет собой синусоиду с частотой β_k и амплитудой, изменяющейся во времени по экспоненте. Если действительная часть двух комплексных корней α_k(см. рис. 4.1, корни p_4 и p_5) то колебательная составляющая (8.7) будет затухать. Если $\alpha_k > 0$ (корни p_8 и p_9), то амплитуда колебаний будет неограниченно возрастать. Наконец, если $\alpha_k == 0$ (корни p_6 и p_7), т. е. если оба сопряженных корня –мнимые ($p_k = j\beta_k$, $p_k = -j\beta_k$), то $x_k(t)$ представляет собой незатухающую синусоиду с частотой β_k.

Если среди корней характеристического уравнения (4.5) имеются l равных между собой корней p_l, то в решении (8.4) вместо l слагаемых вида $C_k e^{\alpha kt}$ появится одна составляющая

$$(C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + \ldots + a_{l-1} t^{l-1})\, e^{p_l t} = 0. \quad (4.8)$$

Учитывая, что функция вида e^{-bt}при любом b убывает быстрее, чем возрастают слагаемые вида t^r, можно доказать, что и в случае кратности корней решение (4.4) будет стремиться к нулю лишь при отрицательности действительной части кратных корней p_l.

На основании проведенного анализа можно сформулировать общее условие устойчивости:

для устойчивости линейной автоматической системы управления необходимо и достаточно, чтобы действительные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными.

Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть, то система будет неустойчивой. Устойчивость системы зависит только от вида корней характеристического уравнения и не зависит от характера внешних воздействий на систему. Устойчивость есть внутреннее свойство системы, присущее ей вне зависимости от внешних условий.

Используя геометрическое представление корней на комплексной плоскости (см. рис. 4.1) в виде векторов или точек, можно дать вторую формулировку общего условия устойчивости (эквивалентную основной):

для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения находились в левой полуплоскости.

Мнимая ось $j\beta$ является границей устойчивости в плоскости корней. Если характеристическое уравнение имеет одну пару чисто мнимых корней (p_k=+$j\beta$, p_{k+i}= $-j\beta_k$), а все остальные корни находятся в левой полуплоскости, то в системе устанавливаются незатухающие гармонические колебания с круговой частотой $\omega = |\beta_k|$. В этом случае говорят, что система находится на колебательной границе устойчивости.

Точка $\beta = 0$ на мнимой оси соответствует так называемому нулевому корню. Если уравнение имеет один нулевой корень, то система находится на апериодической границе устойчивости. Если таких корня два, то система неустойчива.

Не следует забывать, что линейные уравнения реальных систем типа (4.1), как правило, получаются в результате упрощений и линеаризации исходных нелинейных уравнений. Возникает вопрос: в какой мере оценка устойчивости по линеаризованному уравнению будет справедлива для реальной системы, не окажут ли существенное влияние на результат анализа отброшенные при линеаризации члены разложения? Ответ на него был дан русским математиком А. М. Ляпуновым в 1892 г. в работе «Общая задача об устойчивости движения». Он сформулировал и доказал следующую теорему: если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один нулевой корень или одну пару мнимых корней, то судить об устойчивости реальной системы по линеаризованному уравнению нельзя. Таким образом, для суждения об устойчивости линейной системы достаточно определить лишь знаки действительных частей корней характеристического уравнения.

В теории автоматического управления разработан ряд правил, с помощью которых можно судить о знаках корней, не решая характеристическое уравнение и не находя числовые значения самих корней. Эти правила называются критериями устойчивости.

Критерии устойчивости могут быть алгебраическими и частотными. Алгебраические критерии устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения. Частотные критерии определяют связь между устойчивостью системы и формой частотных характеристик системы.

При анализе устойчивости систем управления обычно решают одну или несколько задач:

1) оценивают, устойчива или нет система при заданных параметрах;

2) определяют допустимый по условию устойчивости диапазон изменения некоторых незаданных параметров системы;

3) выясняют, может ли система при заданной структуре быть в принципе устойчивой.

5.2. Алгебраические критерии устойчивости

Простейшим критерием устойчивости является условие положительности коэффициентов характеристического уравнения. Положительность коэффициентов уравнения (8.4) является необходимым (но не достаточным!) условием устойчивости системы. Это означает, что если все коэффициенты положительны, то система может быть устойчивой или неустойчивой. Но если хотя бы один коэффициент уравнения отрицателен или равен нулю, то система неустойчива.

Наиболее распространены в инженерной практике критерии Гурвица и Рауса.

Критерий Гурвица был сформулирован и доказан в 1895 г. немецким математиком А. Гурвицем, который разработал свой критерий, решая чисто математическую задачу – задачу исследования устойчивости решений линейного дифференциального уравнения. Применительно к задачам теории управления критерий Гурвица можно сформулировать так:

автоматическая система, описываемая характеристическим уравнением 8.5 устойчива, если при a_0> 0 положительны все определителиΔ_i вида

$$\Delta_i = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2i-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2i-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & a_{2i-3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \dots & & \dots & a_{i-2}a_i \end{vmatrix}, \quad i = 1,\ 2,\ \dots,\ n. \qquad (5.11)$$

(Как составляется определитель матрицы **i*i**).

Если хотя бы один из определителей (4.9), называемых определителями Гурвица, отрицателен, то система неустойчива.

Так как последний столбец главного определителя Δ_n содержит всегда только один элемент a_n, отличный от нуля, то согласно известному свойству определителей $\Delta_n = a_n\Delta_{n-1}$.

Если главный определитель $\Delta_n == 0$, а все остальные определители положительны, то система находится на границе устойчивости. С учетом выражения (4.12) это условие распадается на два: $a_n = 0$ и $\Delta_{n-1} = 0$.

Условию $a_{n.} = 0$ соответствует один нулевой корень, т. е. апериодическая граница устойчивости, а условию $\Delta_{n-1} = 0$ – пара мнимых корней, т. е. колебательная граница устойчивости.

Критерий Гурвица целесообразно применять для анализа устойчивости систем не выше пятого порядка. При п> 5 вычисление определителей становится громоздким.

Критерий Рауса, предложенный в 1877 г. английским математиком Э. Дж. Раусом, целесообразно использовать при анализе устойчивости систем выше четвертого порядка. Для этого из коэффициентов характеристического уравнения (4.5) составляют таблицу (табл. 4.1), в первой строке ($i = 1$) которой записаны коэффициенты уравнения с четными индексами, во второй ($i =2$) – с нечетными индексами, в последующих строках ($i> 3$) помещены коэффициенты Рауса, полученные как комбинации коэффициентов двух вышестоящих строк по формуле

$r_{ik} = r_{i-2, k+1} - (r_{i-2, 1}r_{i-1, k+1} / r_{i-1, 1})$, (4.10)

где i – номер строки, k – номер столбца. Сам критерий формулируется так: автоматическая система устойчива, если.положительны все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса (включая a_0 и a_1).

Таблица Коэффициенты Рауса

Строка	Столбец					
	1	2	3	. . .	k	. . .
1	$r_{11} = a_0$	$r_{12} = a_2$	$r_{13} = a_4$	. . .	r_{1k}	. . .
2	$r_{21} = a_1$	$r_{22} = a_3$	$r_{23} = a_5$	. . .	r_{2k}	. . .
3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	. . .	r_{3k}	. . .
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
i	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	. . .	r_{ik}	. . .
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
$n+1$	$r_{n+1,1}$	$r_{n+1,2}$	$r_{n+1,3}$	. . .	$r_{n+1,k}$	. . .

Если не все коэффициенты столбца положительны, то система неустойчива. При этом число перемен знака среди этих коэффициентов соответствует числу правых корней характеристического уравнения. Алгоритм вычисления коэффициентов (4.10) легко запрограммировать, поэтому критерий Рауса используют для анализа систем высокого порядка (n> 5) с помощью ЭВМ.

Преимуществом критериев Гурвица и Рауса является то, что с их помощью можно оценивать устойчивость как замкнутых, так и разомкнутых систем. Вывод об устойчивости при применении этих критериев делается применительно к той системе (замкнутой или разомкнутой), уравнение которой анализируется.

Недостатком является малая наглядность.

Критерии Михайлова

Критерий Михайлова относится к группе частотных критериев устойчивости. Он был сформулирован и обоснован в 1936 г. советским ученым А. В. Михайловым в работе «Гармонический метод в теории регулирования», которая получила высокую оценку и послужила началом широкого применения частотных методов в теории автоматического управления.

Критерий Михайлова так же, как критерии Гурвица и Рауса, основан на анализе характеристического уравнения системы, поэтому с его помощью можно судить об устойчивости замкнутых и разомкнутых систем.

Пусть левая часть характеристического уравнения, называемая характеристическим полиномом, имеет вид

$$F(p) = a_0 p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n. \quad (4.11)$$

Подставим в этот полином вместо переменного p чисто мнимый корень, который в дальнейшем будем обозначать $j\omega$. Тогда получим функцию комплексного переменного

$$F(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \ldots + a_{n-1} j\omega + a_n, \quad (4.12)$$

которую можно так же, как амплитудно–фазовую характеристику, представить в виде суммы действительной и мнимой частей:

$$F(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (4.13)$$

Действительная часть $P(\omega)$ содержит только четные степени переменного ω:

$$P(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \ldots, \quad (4.14)$$

а мнимая часть $Q(\omega)$– только нечетные:

$$Q(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \ldots. \quad (4.15)$$

Каждому фиксированному значению переменного ω соответствует комплексное число, которое можно изобразить в виде вектора на комплексной плоскости. Если теперь изменять параметр ω от 0 до ∞, то конец вектора $F(j\omega)$ опишет некоторую линию (рис. 4.2, а), которая называется характеристической кривой или годографом Михайлова. По виду этой кривой можно судить об устойчивости системы.

Формулировка критерия Михайлова:

автоматическая система управления, описываемая уравнением п–го порядка, устойчива, если при изменении ω от 0 до ∞ характеристический вектор системы $F(j\omega)$ повернется против часовой стрелки на угол $n\pi/2$, не обращаясь при этом в нуль.

Это означает, что характеристическая кривая устойчивой системы должна при изменении ω от 0 до ∞ пройти последовательно через п квадрантов. Из выражений (4.14) и (4.15) следует, что кривая $F(j\omega)$ всегда начинается в точке на действительной оси, удаленной от начала координат на величину a_n.

Характеристические кривые, соответствующие устойчивым системам (рис. 4.2, б), имеют плавную спиралеобразную форму и уходят в бесконечность в том квадранте, номер которого равен порядку уравнения. Если характеристическая кривая проходит п квадрантов не последовательно или проходит меньшее число квадрантов, то система неустойчива (рис. 4.2, в).

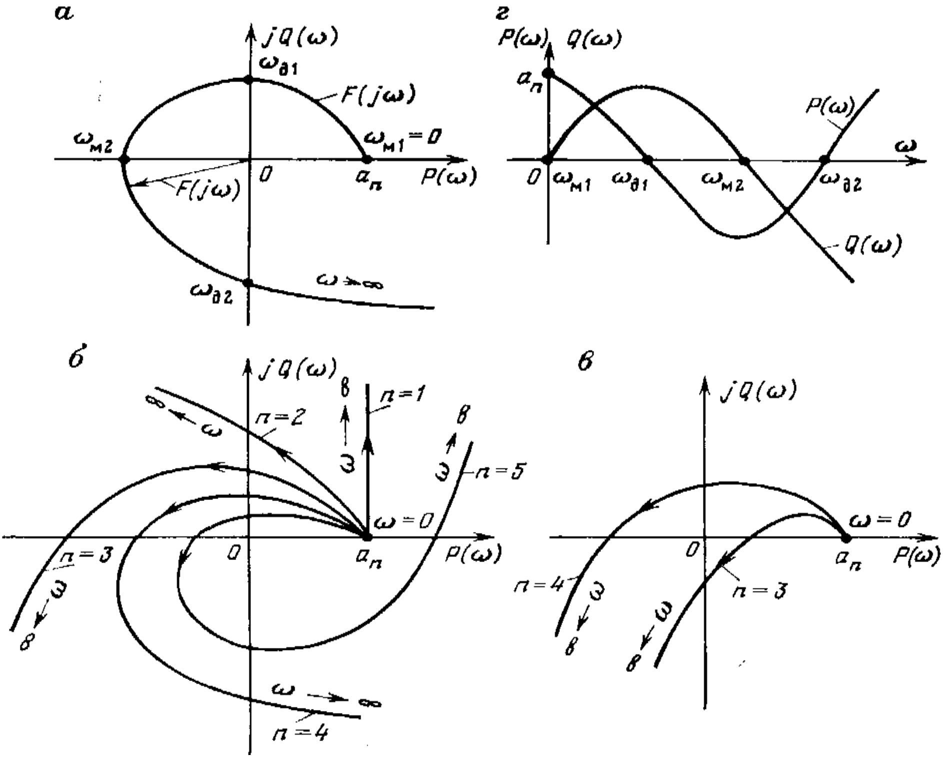


Рисунок. Характеристические кривые (годографы) Михайлова

Если кривая F(jω) проходит через начало координат, то система находится на границе устойчивости. Действительно, если характеристическое уравнение имеет один нулевой корень $p_k = 0$ (апериодическая граница устойчивости) или одну пару чисто мнимых корней $p_k = \pm j\beta_k$ (колебательная граница устойчивости), то функция F(jω) при ω = 0 или $\omega = \beta_k$ обратится в нуль.

В практических расчетах удобно применять следствие из критерия Михайлова: система устойчива, если действительная и мнимая части характеристической функции F(jω) обращаются в нуль поочередно , т. е. если корни уравнений P(ω) = 0 и Q(ω) = 0 перемежаются.

Это утверждение вытекает непосредственно из формулировки критерия Михайлова – из условия последовательного прохождения кривой F(jω) через п квадрантов.

Критерий Михайлова удобно применять для анализа устойчивости систем высокого порядка (п> 5).

5.3. Формулировка критерия Найквиста

Критерий был сформулирован в 1932 г. американским физиком Х. Найквистом, а обоснован и применен для анализа автоматических систем управления Михайловым А. В.

Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости системы по амплитудно–фазовой характеристике разомкнутого контура системы. В этом заключается существенное преимущество критерия, так как построение амплитудно–фазовой характеристики разомкнутого контура для большинства реальных систем оказывается проще, чем построение годографа Михайлова. Особенно упрощается это построение для одноконтурных систем, состоящих из типовых звеньев. А в тех случаях, когда неизвестно математическое описание нескольких конструктивных элементов системы и оценка их свойств возможна только путем экспериментального определения частотных характеристик, критерий Найквиста является единственно пригодным.

Основная формулировка критерия Найквиста:

автоматическая система управления устойчива, если амплитудно–фазовая характеристика $W(j\omega)$ разомкнутого контура не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

Эта формулировка справедлива для систем, которые в разомкнутом состоянии устойчивы. Таковыми являются большинство реальных систем, состоящих из устойчивых элементов.

На рис. 4.3, а изображены амплитудно–фазовые характеристики разомкнутого контура, соответствующие трем различным случаям: система устойчива (кривая 1); система находится на колебательной границе устойчивости (кривая 2); система неустойчива (кривая 3).

Критерий Найквиста физически можно интерпретировать следующим образом. Предположим, что на входе системы (рис. 4.3, б) действует гармонический сигнал $g(t) == g_m \mathrm{Sin}\omega t$ с малой амплитудой g_m. Пусть частота ω равна частоте ω_π, при которой фазовый сдвиг $\varphi(j\omega)$, создаваемый звеном $W(j\omega)$, равен $-\pi$. Тогда сигнал отрицательной обратной связи окажется в фазе с сигналом $g(t)$, и мгновенные значения сигналов будут суммироваться.

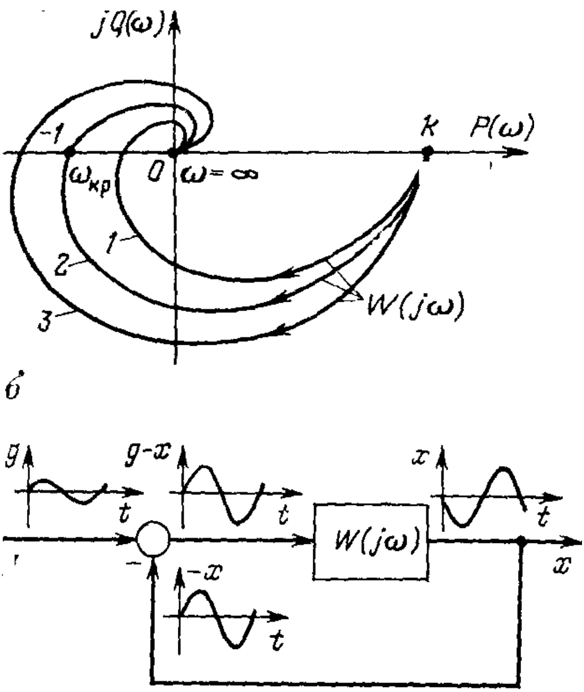


Рисунок. Амплитудно–фазовые характеристики разомкнутого контура (а) и физическая трактовка (б) критерия Найквиста

Если на частоте $\omega = \omega_\pi$, модуль | W (jω) | = 1 (нет усиления и нет подавления), то в контуре системы будут поддерживаться незатухающие колебания даже после исчезновения внешнего воздействия g (t), т. е. система будет находиться на границе устойчивости. Характеристика W(jω) при этом проходит через точку (–1; j0). Если на частоте $\omega = \omega_\pi$ модуль |W(jω)| < 1 (подавление есть), то после исчезновения внешнего воздействия колебания в контуре затухнут, т. е. система устойчива, характеристика не охватывает точку (–1; j0). Если же модуль |W(jω)| > 1 (усиление есть), то амплитуда сигналов в контуре будет неограниченно возрастать, т. е. система будет неустойчивой. Характеристика W (jω) в этом случае охватит точку (–1; j0).

Таким образом, особая роль точки (–1; j0) заключается в том, что она, во-первых, соответствует превращению отрицательной обратной связи в положительную, и во-вторых, является граничной между режимами усиления и ослабления сигналов звеном W (jω).

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория автоматического управления. Часть 1 / Под ред. Воронова А.А. – М.: Высшая школа, 1986.–367 с.

2. Петровский В.С., Харитонов В.В. Автоматика и автоматизация производственных процессов лесопромышленных предприятий. – М,: Лесная промышленность, 1990. – 240 с.

3. Пиргач Н.С. Пиргач В.С. Автоматическое регулирование и регуляторы. – М,: Лесная промышленность, 1975. –264 с.

4. Ползик П.В. и др. Автоматика и автоматизация производственных процессов деревообрабатывающих предприятий. – М,: Лесная промышленность, 1987. – 440 с.

5. Теория автоматического управления / Под ред. Соломенцева Ю.М. . – М,: Машиностроение, 1992. –268 с.

6.Теория автоматического управления: Учебник для студентов вузов / С. Е. Душин [и др.]; под ред. В. Б. Яковлева. – Изд. 3–е, стер. – М. : Высшая школа, 2009. – 567 с.

7. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие / А. А. Первозванский. – Изд. 2–е, стер. – СПб. ; М.: Краснодар: Лань, 2010. – 624 с.

8. Коновалов Б. И.Теория автоматического управления: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 210106 – "Пром. электроника", направления подготовки дипломир. специалистов 210100 – "Электроника и микроэлектроника" / Б. И. Коновалов, Ю. М., Лебедев. – Изд. 3–е, доп. и перераб. – СПб. ; М.: Краснодар: Лань, 2010. – 224 с.

9. Корнеев Н. В. Теория автоматического управления с практикумом: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Автомобиле– и тракторостроение" / Н. В. Корнеев, Ю. С. Кустарев, Ю. Я. Морговский. – М.: Академия, 2008. – 224 с.

10. Толпежников Л.И. Автоматическое управление процессами шахт и рудников. Учебник для вузов.2–е изд., перераб. и доп. М.:Недра, 1985. –353 с.

11. Гаврилов П.Д., Гимельштейн Л.Я., Медведев А.Е. Автоматизация производственных процессов. Учебник для вузов.М.:Недра, 1985–.215 с.

12. Батицкий В.А.. Куроедов В.I., Рыжков А.А. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности: Учеб. Для техникумов.– 2–е узд.. переаб. И доп.–М.:Недра, 1991.–303 с.

13. Демин В.В. Лабораторный практикум по рудничной автоматике и телемеханике:Учебное пособие для техникумов.–М.:Недра, 1981.–236 с.

Учебное издание

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»
для студентов направления подготовки
Профессиональное обучение (по отраслям),
профили «Электроснабжение», «Горное дело. Электромеханическое оборудование, автоматизация процессов добычи полезных ископаемых и руд»

С о с т а в и т е л и:
Александр Геннадиевич Петров
Евгений Николаевич Шелемей

Печатается в авторской редакции.
Компьютерная верстка и оригинал-макет автора.

Подписано в печать ______________
Формат 60x84 1/16. Бумага типограф. Гарнитура Times
Печать офсетная. Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _______
Тираж 100 экз. Изд. №______. Заказ №______. Цена договорная.

Издательство Луганского государственного
университета имени Владимира Даля

Свидетельство о государственной регистрации издательства
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015г.

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а
Телефон: 8 (0642) 41-34-12, **факс:** 8 (0642) 41-31-60
E-mail: uni@snu.edu.ua **http**: www.snu.edu.ua