ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

♦ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ♦

УДК 681.5.(075)
ББК ç965 я75
М915

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т

Доктор технических наук, профессор
В.А. Погонин

С о с т а в и т е л и:

Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев

М915 Основы автоматики и системы автоматического управления : метод. указ. / сост. : Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 32 с. – 100 экз.

Даны методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Основы автоматики и системы автоматического управления". Приводятся необходимые теоретические сведения.

Предназначены для студентов специальности 210201 дневной и заочной форм обучения, магистрантов направления 210200 при изучении дисциплины "Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов", а также студентов дистанционной формы обучения и экстерната.

УДК 681.5.(075)
ББК ç965 я75

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рекомендовано УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве методических указаний по выполнению лабораторных работ для студентов 3 и 4 курсов дневной и заочной форм обучения специальности 210201

Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

**ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Методические указания

С о с т а в и т е л и:

МУРОМЦЕВ Юрий Леонидович,
МУРОМЦЕВ Дмитрий Юрьевич

Редактор З.Г. Ч е р н о в а

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Р ы ж к о в а

Подписано в печать 02.03.2009
Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 66

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Для нормального функционирования многих объектов и процессов, т.е. чтобы они выполняли своё целевое предназначение, ими требуется управлять. Управление заключается в том, чтобы на основе имеющейся информации вырабатывать воздействия на объект, которые изменяют протекающие в нём процессы для достижения задаваемой цели управления. Следует отметить, что цели управления формулируют не разработчики автоматических систем (АС), а специалисты в области техники и области знаний, к которой относится объект (технологический процесс). Целями управления могут быть, например, обеспечение постоянства частоты генератора, стабилизация напряжения на выходе блока питания, устранение ошибки радиолокатора при слежении за целью и т.д.

Объект (процесс) находится под автоматическим управлением, если цели управления достигаются при редком вмешательстве человека. Для реализации автоматического управления используются различные сигналы и элементы АС.

Сигналами называются физические процессы, параметры которых содержат информацию (информационные параметры). Например, сигнал – напряжение переменного тока, информационный параметр частота. Основными сигналами в АС являются входные $x(t)$ и выходные $y(t)$ сигналы, в общем случае сигналы изменяются во времени t. *Входными сигналами* наиболее часто являются задающее воздействие или заданное значение выходного сигнала $y_{\text{зад}}(t)$ и возмущающие воздействия $v(t)$. В дальнейшем входные и выходные сигналы будут рассматриваться как для всей автоматической системы, так и её отдельных частей или элементов. При этом выходной сигнал одного элемента обычно является входным сигналом следующего элемента. Например, выходной сигнал управляющего устройства является входным для объекта управления.

При рассмотрении систем автоматического управления первоначально исследуется объект (процесс), которым надо управлять, и цель управления. В объекте выделяют протекающие в нём физические процессы и модели, описывающие эти процессы. Формулировка цели управления должна включать: чего требуется достичь в результате управляющих воздействий (высокой производительности, точности и т.п.), какими переменными следует управлять, какой необходим уровень действий.

Элементы, образующие автоматическую систему, как правило, обладают свойством однонаправленности, т.е. сигнал, поступающий на вход элемента, преобразуется в нём в выходной сигнал. Важную роль в автоматических системах играют следующие элементы: датчики, элементы сравнения, управляющие устройства, исполнительные механизмы, линии связи. Датчики позволяют оценивать состояние управляемого объекта. Если необходимые для целей управления переменные недоступны непосредственному измерению, то во многих случаях необходимую информацию получают из других источников, используя так называемые виртуальные датчики.

Исполнительные механизмы выполняют функцию перевода объекта (процесса) из текущего состояния в желаемое в соответствии с сигналами, вырабатываемыми устройствами обработки информации. В качестве этих устройств используются разнообразные вычислительные средства – программируемые контроллеры, ломиконты и др.

Для соединения между собой датчиков, управляющих устройств, исполнительных механизмов и объектов управления используются различные линии связи, к которым предъявляются требования по отсутствию искажений и задержек при передаче сигналов. Во многих случаях сигналы в системах автоматического управления (САУ) передаются на большие расстояния, что накладывает дополнительные требования к линиям связи – их надежности, помехоустойчивости и т.д.

Необходимо отметить, что в связи с широким использованием микропроцессорной техники в САУ, важной составной частью автоматических систем стало программное обеспечение автоматического управляющего устройства. Более того, наблюдается тенденция замены некоторых аппаратных средств программными средствами.

Класс линейных САУ составляет основу и наиболее полно исследован в классической теории автоматического управления. Важнейшим свойством линейных систем является то, что для них справедлив *принцип суперпозиции* или наложения, который заключается в следующем: реакция системы на сумму входных воздействий равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности. В линейных непрерывных САУ входные и выходные сигналы являются непрерывными функциями времени.

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

При анализе линейных систем различают переходные и установившиеся процессы. Свойства систем и их элементов (звеньев) для этих процессов определяются динамическими и статическими характеристиками.

В общем случае *статическая характеристика* (СХ) для системы с сосредоточенными параметрами с одним входом и одним выходом представляет собой зависимость выходной переменной y от значения входной переменной x в установившемся режиме и записывается в форме алгебраического уравнения

$$y = f(x), \quad x \in X, \tag{1.1}$$

где X – область значений x.

Уравнение (1.1) называют уравнением статики. Для объектов с m входами статическая характеристика записывается в виде функции y от нескольких входных переменных, т.е.

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_m).$$

В случае линейной системы с одним входом и одним выходом СХ (1.1) записывается как уравнение прямой линии $y = K_0 + Kx$ или $y = Kx$; здесь K_0, K – постоянные коэффициенты; коэффициент K называют передаточным коэффициентом или коэффициентом усиления.

Для линейной системы с m входами статическая характеристика имеет вид

$$y = K_0 + K_1 x_1 + ... + K_m x_m,$$

а для многомерной системы с m входами и m выходами СХ записывается как система линейных уравнений

$$\begin{aligned} y_1 &= K_{10} + K_{11} x_1 + ... + K_{1m} x_m, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y_m &= K_{m0} + K_{m1} x_1 + ... + K_{mm} x_m. \end{aligned}$$

Звенья САУ, имеющие СХ, называют *статическими звеньями*, а объекты управления – *объектами с самовыравниванием*. Знание статической характеристики объекта управления необходимо для выбора режимов работы, определения области, в пределах которой объект можно считать линейным, расчёта функций чувствительности к изменению входных переменных и т.д.

Для системы, состоящей из n последовательно соединённых линейных звеньев со статическими характеристиками

$$y_i = K_i x_i, \quad i = \overline{1, n},$$

когда выход одного звена является входом другого $(y_i = x_{i+1})$, СХ всей системы со входом $x = x_1$ и выходом $y = y_n$ имеет аналогичный вид, т.е.

$$y = Kx,$$

при этом передаточный коэффициент K системы равен произведению передаточных коэффициентов звеньев, т.е.

$$K = \prod_{i=1}^{n} K_i.$$

Передаточный коэффициент системы при параллельном соединении звеньев, когда

$$x_1 = x_2 = \ldots = x_n = x \quad \text{и} \quad y = \sum_{i=1}^{n} y_i$$

равен сумме значений K_i, т.е. $K = \sum_{i=1}^{n} K_i$.

В случае соединения звеньев по схеме отрицательной обратной связи, когда управление u пропорционально разности между заданным значением $y_{зад}$ и y, т.е.

$$u = K_{уу}\Delta y, \quad y = K_{о}u, \quad \Delta y = y_{зад} - y,$$

статическая характеристика замкнутой САУ имеет вид

$$y = \frac{K_{уу}K_{о}}{1 + K_{уу}K_{о}} y_{зад},$$

где $K_{уу}$, $K_{о}$ – передаточные коэффициенты управляющего устройства и объекта, соответственно.

Следует заметить, что при описании статической характеристики звена важно указать диапазон значений изменения x, при котором зависимость выхода y от x можно считать линейной, а для статической характеристики САУ следует указать диапазоны линейности, входящих в её состав звеньев.

Некоторые звенья (системы, объекты) не имеют СХ. Например, если у электродвигателя в качестве выходной величины y рассматривать угол поворота якоря, а в качестве входной x – подводимое напряжение, то при $x \neq 0$ установившегося значения y не наступает. Такие звенья называют *астатическими звеньями*, а объекты – *объектами без самовыравнивания.*

Свойства объекта, САУ и отдельных её звеньев в переходных процессах (динамических режимах) определяются с помощью *динамических характеристик* (ДХ). В зависимости от свойств системы и решаемых задач анализа и синтеза для описания переходных процессов в САУ используются дифференциальные уравнения, передаточные функции, частотные и временные характеристики.

Основные задачи, решаемые с использованием различных ДХ применительно к непрерывным САУ, приведены в табл. 1.1. Дифференциальные уравнения (ДУ) наиболее часто используются в качестве моделей динамических режимов как объектов управления, так и САУ. По известному ДУ можно получить любые другие ДХ системы. Так, для определения временных характеристик необходимо решить ДУ при соответствующем входном сигнале, передаточная функция находится с использованием преобразования Лапласа, а амплитудно-фазочастотная характеристика – преобразования Фурье. Обычно ДХ составляет основу математической модели исследуемой системы.

1.1. Области применения различных динамических характеристик

Динамические характеристики	Свойства системы	Область использования
Дифференциальные уравнения	Линейные и нелинейные	Анализ устойчивости, оптимальное управление, моделирование, построение модели на основе физических законов
Передаточные функции	Линейные	Синтез САУ, анализ устойчивости
Частотные	Линейные и нелинейные	Анализ устойчивости, идентификация модели
Временные	Линейные и нелинейные	Идентификация модели, оценка качества управления

Способы получения различных динамических характеристик по известным другим ДХ приведены в табл. 1.2. Динамические характеристики САУ по известным ДХ входящих в её состав частей обычно получают с использованием *передаточных функций* (ПФ). Это объясняется тем, что по известной структурной схеме САУ и передаточным функциям её звеньев с использованием простых алгебраических операций легко получить ПФ всей системы.

Передаточной функцией системы (или звена) $W(p)$ с входом $x(t)$ и выходом $y(t)$ называется отношение преобразования Лапласа выхода $Y(p) = L[y(t)]$ к преобразованию Лапласа входа $X(p) = L[x(t)]$ (при нулевых начальных условиях), т.е.

$$W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}, \tag{1.2}$$

где p – параметр преобразования Лапласа.

1.2. Связи между динамическими характеристиками

Известные ДХ	Получаемые ДХ				
	ДУ	$W(p)$	$W(j\omega)$	$h(t)$	$w(t)$
ДУ		$\mathcal{L}$, $\left(\frac{d}{dt}\to p\right)$	$\mathcal{F}$, $\left(\frac{d}{dt}\to j\omega\right)$	Решение ДУ при $x(t)=1(t)$	Решение ДУ при $x(t)=\delta(t)$
$W(p)$	$L^{-1}\,[W(p)]$		Замена $p\to j\omega$	$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{p}\,W(p)\right]$	$\mathcal{L}^{-1}\,[\,W(p)]$
$W(j\omega)$	$\mathcal{F}^{-1}[W(j\omega)]$	Замена $j\omega\to p$		$\mathcal{F}^{-1}\left[\frac{1}{j\omega}\,W(j\omega)\right]$	$\mathcal{F}^{-1}\,[\,W(j\omega)]$
$h(t)$	Иденти-фикация	$\mathcal{L}\left[h'(t)\right]$	$\mathcal{F}\left[h'(t)\right]$		$\frac{dh(t)}{dt}$
$w(t)$	Иденти-фикация	$\mathcal{L}\,[\,w(t)]$	$\mathcal{F}\,[\,w(t)]$	$\int_0^t w(\tau)\,d\tau$	

Передаточная функция системы $W_{\text{c}}(p)$ находится по передаточным функциям $W_i(p)$ её элементарных звеньев с использованием следующих формул:

- последовательное соединение n звеньев, когда выходная величина предыдущего звена является входной для последующего

$$W_{\text{c}}(p)=\prod_{i=1}^{n}W_i(p); \tag{1.3}$$

- параллельное соединение n звеньев (здесь входная величина одновременно подается на входы всех звеньев, а выходная равна сумме выходных величин отдельных звеньев

$$W_{\text{c}}(p)=\sum_{i=1}^{n}W_i(p); \tag{1.4}$$

- соединение с отрицательной обратной связью (частный случай встречно-параллельного соединения звеньев $W_1(p)$ и $W_{\text{oc}}(p)$, когда на вход соединения одновременно с входной величиной x системы, подаётся ее выходная величина, прошедшая через звено обратной связи с передаточной функцией $W_{\text{oc}}(p)$:

$$W_{\text{c}}(p)=\frac{W_1(p)}{1+W_1(p)\,W_{\text{oc}}(p)}; \tag{1.5}$$

- соединение с положительной обратной связью (другой частный случай встречно-параллельного соединения)

$$W_{\text{c}}(p)=\frac{W_1(p)}{1-W_1(p)\,W_{\text{oc}}(p)}. \tag{1.6}$$

При решении задач анализа и синтеза автоматических радиоэлектронных устройств широко используются частотные характеристики – *амплитудно-фазовая частотная характеристика* (АФЧХ), *амплитудно-частотная* *характеристика* (АЧХ) и *фазо-частотная характеристика* (ФЧХ). Это объясняется тем, что многие сигналы в радиосхемах представляют в виде суммы гармонических сигналов, возможностью экспериментального определения частотных характеристик и удобством их использования при рассмотрении структурных схем САУ, исследовании устойчивости и других свойств системы.

АФЧХ или комплексная частотная характеристика $W(j\omega)$ определяется как отношение преобразования Фурье F выхода системы

$$Y(j\omega)=\int_0^{\infty} y(t)\,e^{-j\omega t}dt$$

к преобразованию Фурье входа

$$X(j\omega)=\int_0^{\infty} x(t)\,e^{-j\omega t}dt,$$

т.е.

$$W(j\omega)=\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}; \tag{1.7}$$

здесь ω – угловая частота; $j=\sqrt{-1}$; $y(t)$, $x(t)$ – односторонние функции, т.е. $y(t)=0$, $x(t)=0$ при $t<0$.

Сигналы на входе и выходе можно записать в виде

$$X(j\omega)=\left|X(j\omega)\right|e^{j\varphi_x(\omega)} \quad \text{и} \quad Y(j\omega)=\left|Y(j\omega)\right|e^{j\varphi_y(\omega)}.$$

Тогда

$$W(j\omega)=\frac{\left|Y(j\omega)\right|e^{j\varphi_y(\omega)}}{\left|X(j\omega)\right|e^{j\varphi_x(\omega)}}=M(\omega)\,e^{j\varphi(\omega)}=P(\omega)+j\,Q(\omega), \tag{1.8}$$

где

$$M(\omega)=\frac{\left|Y(j\omega)\right|}{\left|X(j\omega)\right|}=\frac{M_y(\omega)}{M_x(\omega)}=\sqrt{P^2(\omega)+Q^2(\omega)};$$

$$\varphi(\omega)=\varphi_y(\omega)-\varphi_x(\omega)=\operatorname{arctg}\left[\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right]. \tag{1.9}$$

Здесь $M(\omega)$ есть АЧХ; (ω) – ФЧХ; $P(\omega)$ – действительная (вещественная) частотная характеристика; $Q(\omega)$ – мнимая частотная характеристика.

Временные характеристики системы представляют собой реакции системы на стандартные входные воздействия:

- единичная ступенчатая функция

$$x(t)=1(t)=\begin{cases}0 & \text{при} \quad t\le 0;\\ 1 & \text{при} \quad t>0;\end{cases}$$

- дельта-функция или единичная импульсная функция

$$x(t)=1'(t)=\delta(t)=\begin{cases}0 & \text{при} \quad t\ne 0;\\ \infty & \text{при} \quad t=0,\end{cases} \quad \text{причём} \quad \int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\,dt=1;$$

- прямоугольный импульс

$$x(t) = N\big(1(t) - 1(t-\tau)\big) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \le 0; \\ N & \text{при } t \in (0; \tau]; \\ 0 & \text{при } t > \tau. \end{cases}$$

Переходная функция (характеристика) $h(t)$ представляет собой процесс изменения $y(t)$ на выходе звена (системы) при подаче на вход $x(t) = 1(t)$. Если на вход подается произвольная ступенчатая функция, т.е. $x(t) = N \cdot 1(t)$, то на выходе будет $y(t) = Nh(t)$. Реакцию объекта на ступенчатую функцию часто называют *кривой разгона.*

Функция веса (импульсная переходная функция) $W(t)$ представляет собой реакцию системы на дельта-функцию. Она удовлетворяет двум следующим условиям:

- условию физической осуществимости (причинности) $W(t),\ t < 0$, т.е. переходный процесс $W(t)$ не может возникнуть раньше подачи на вход сигнала $\delta(t)$ при $t = 0$;
- условию, определяющему устойчивость системы $\int\limits_0^\infty |W(t)|\, dt < \infty$.

Нетрудно показать, что $W(t) = \dfrac{dh(t)}{dt}$.

Рассматривая различные виды ДХ следует отметить, что важно знать, во-первых, при решении каких задач следует использовать соответствующую характеристику, и, во-вторых, как получить необходимую ДХ по известной другой. Наиболее часто при решении задач анализа и синтеза САУ и особенно при решении задач оптимального управления применяется описание динамики в виде дифференциального уравнения. Задачи структурного синтеза, когда по ДХ элементарных звеньев требуется получить ДХ системы, решаются с использованием передаточных функций и частотных характеристик. Для обеспечения требуемых свойств САУ на основе введения корректирующих звеньев обычно используются логарифмические частотные характеристики. При определении ДХ по экспериментальным данным предпочтение отдаётся временным и частотным характеристикам.

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА

Цель работы: экспериментальным методом исследовать зависимость между входной и выходной переменными объекта управления в статических режимах.

Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, способами изменения входной переменной (управляющего воздействия) и регистрации значений выходной переменной (регулируемой величины).
2. Освоить теоретические положения о статических характеристиках объекта, приведённые в методических указаниях.
3. Составить план проведения эксперимента (области изменения переменных, число опытов).
4. Получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы и вариант задания.
5. Подготовить лабораторную установку к работе в соответствии с вариантом задания (заполнить ёмкость требуемым объёмом холодной воды, включить и проверить измерительную аппаратуру).
6. Провести опыты в соответствии с планом эксперимента, регистрируя установившиеся значения входных и выходных переменных.
7. Обработать экспериментальные данные. Построить график статической характеристики. При необходимости выполнить операцию сглаживания.
8. Получить аналитическое описание статической характеристики с использованием методов аппроксимации. Оценить погрешность.

Для статической характеристики $y = a + bx$ оценка параметров a, b методом наименьших квадратов выполняется решением системы нормальных уравнений:

$$na + b\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} y_i\,;$$

$$a\sum_{i=1}^{n} x_i + b\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i\,,$$

где n – число экспериментальных точек.

В случае нелинейной статической характеристики вида

$$y = a + bx + cx^2$$

решается система уравнений

$$na + b\sum_{i=1}^{n} x_i + c\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i\,;$$

$$a\sum_{i=1}^{n} x_i + b\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + c\sum_{i=1}^{n} x_i^3 = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i;$$

$$a\sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b\sum_{i=1}^{n} x_i^3 + c\sum_{i=1}^{n} x_i^4 = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i^2\,.$$

9. Сделать вывод по результатам эксперимента для полученной статической характеристики о свойствах объекта (линейность, детерминированность и др.)
10. Оформить отчёт по работе.

Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения о статических характеристиках объекта и используемом математическом аппарате при получении статической характеристики экспериментальным методом.
3. Схема лабораторной установки.
4. Таблица с планом и результатами эксперимента. Графическое представление данных.
5. Аналитическое описание статической характеристики в виде аппроксимирующих зависимостей, используемые при этом программные средства.
6. Выводы по работе.
7. Список используемой литературы.

Лабораторная работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА

Цель работы: ознакомиться с методами определения динамических характеристик и получить навыки определения переходной функции (кривой разгона) по экспериментальным данным.

Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, способами изменения входной переменной (управляющего воздействия) и регистрации значений выходной переменной (регулируемой величины).
2. Освоить теоретические положения о динамических характеристиках объекта, приведённые в методических указаниях.
3. Составить план проведения эксперимента (диапазон и вид изменения входной переменной, число опытов).
4. Получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы и вариант задания.
5. Подготовить лабораторную установку к работе в соответствии с вариантом задания (заполнить ёмкость требуемым объёмом холодной воды, включить и проверить измерительную аппаратуру).
6. Включить установку и зарегистрировать данные по изменению входных и выходных переменных во времени. Представить переходную функцию объекта графически.
7. Выдвинуть гипотезу о модели динамики объекта.
8. Рассчитать параметры модели динамики объекта и оценить погрешность модели.

9. Для модели записать дифференциальное уравнение, передаточную функцию и частотные характеристики, построить графики частотных характеристик.

10. Сделать вывод по результатам эксперимента (по виду полученных динамических характеристик) о свойствах объекта.

11. Оформить отчёт по работе.

Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения о динамических характеристиках объекта, используемом математическом аппарате и программных средствах при получении динамических характеристик экспериментальным методом.
3. Таблица с планом и результатами эксперимента, графическое представление данных.
4. Аналитическое выражение модели динамики. Рассчитанные параметры модели динамики объекта, погрешность полученной модели (дифференциальное уравнение, передаточная функция и частотные характеристики, табличные данные частотных характеристик и их графики).
5. Выводы по работе, заключение об адекватности модели.
6. Список используемой литературы.

2. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Задачи анализа и синтеза занимают центральное место в теории автоматического управления. Задача синтеза САУ заключается в определении общей структурной схемы управления системы, технических средств её реализации, включая требования к объекту управления, а также всех параметров, входящих в систему устройств, на основе технических требований, предъявляемых к системе. Выделяют следующие задачи синтеза: синтез алгоритмов (законов) управления на стадии проектирования САУ; синтез управлений в процессе функционирования автоматической системы; синтез регулятора в терминах эталонной системы; синтез корректирующих устройств и др.

Обычно задачи синтеза и анализа решаются в тесной взаимосвязи: в результате синтеза разрабатывается вариант структурной схемы системы управления, затем выполняется её анализ; на основе результатов анализа вносятся структурные изменения или разрабатывается другой вариант и т.д. Такой процесс продолжается до тех пор, пока САУ не будет удовлетворять задаваемым требованиям.

Большинство задач синтеза в качестве составных частей включают обеспечение устойчивости, повышение запаса устойчивости, повышение точности в установившемся режиме и улучшение переходных процессов.

Устойчивость и необходимый запас устойчивости обычно обеспечиваются введением форсирующего звена, при этом увеличивается быстродействие системы, но вместе с тем увеличивается и влияние помех. Другой путь обеспечения устойчивости – использование демпфирования с подавлением высоких частот. Для этого вводится апериодическое звено с постоянной времени значительно большей постоянных времени апериодических звеньев разомкнутой системы.

Повышение точности в установившемся режиме (уменьшение установившейся ошибки) достигается увеличением передаточного коэффициента K разомкнутой системы (добротности системы). При этом необходимо контролировать запас устойчивости, так как при большом значении K (больше критического) система становится неустойчивой. Для получения астатизма системы используются изодромные звенья. При большой постоянной времени изодрома запас устойчивости практически сохраняется без изменения.

Широкое распространение на практике получили линейные регулирующие устройства, которые в зависимости от сигнала ошибки $e(t)$ вырабатывают управляющее воздействие $u(t)$, используя комбинации последовательного соединения пропорционального (П), интегрирующего (И) дифференцирующего (Д) звеньев. Модели динамики регуляторов, построенных на основе этих звеньев, приведены в табл. 2.1.

Для расчёта параметров настройки регуляторов в основном применяется два подхода. Первый подход предполагает точное определение параметров с использованием заданной передаточной функции объекта $W_о(p)$ и эталонной ПФ $W_э(p)$. Эталонная передаточная функция – это такой оператор замкнутой САУ, который обеспечивает требуемое качество процессов управления в переходном и установившемся режимах. Если для разомкнутой системы

$$W_{раз}(p) = W_{рег}(p)\, W_о(p), \tag{2.1}$$

то передаточная функция регулятора, определяющая его структуру и параметры, при данном подходе имеет вид

$$W_{раз}(p) = W_{рег}(p) = W_о^{-1}(p)\frac{W_э(p)}{1 - W_э(p)}. \tag{2.2}$$

На практике применяются различные приближённые методики определения параметров настройки регуляторов. В качестве примера рассмотрим методику колебаний Зиглера-Никольса настройки регуляторов для устойчивых объектов, которая заключается в следующем. На реальном объекте с П-регулятором начинают постепенно увеличивать значение коэффициента $K_р$ до тех пор, пока в замкнутой системе не возникнут колебания.

2.1. Модели динамики линейных регуляторов

Наименование управляющего устройства	Передаточная функция	Дифференциальное уравнение	Параметры настройки
П-регулятор (пропорциональный)	$W_п(p)=K_р$	$u(t)=K_р e(t)$	$K_р$
И-регулятор (интегральный)	$W_и(p)=\dfrac{K_и}{p}=\dfrac{1}{T_и p}$	$u(t)=K_и\int_0^t e(\tau)\,d\tau$	$K_и=\dfrac{1}{T_и}$
ПИ-регулятор (изодромный)	$W_{пи}(p)=K_р+\dfrac{K_и}{p}= = K+\dfrac{1}{T_{из}p}$	$u(t)=K\left(e(t)+\dfrac{1}{T_{из}}\int_0^t e(t)\,d\tau\right)$	$K_р$, $T_{из}=K_р T_и$
ПД-регулятор (пропорциональный с предварением)	$W_{пд}(p)=K_р+K_д p= =K_р(1+T_{пв}p)$	$u(t)=K_р e(t)+T_{пв}\dfrac{de(t)}{dt}$	$K_р$, $T_{пв}$
ПИД-регулятор (пропорционально-дифференциально-интегральный)	$W_{пид}(p)=K_р+\dfrac{1}{T_и p}+K_д p= =K\left(1+\dfrac{1}{T_{из}p}+T_{пв}p\right)$	$u(t)=K\left(e(t)+\dfrac{1}{T_{из}}\int_0^t e(t)\,dt+T_{пв}\dfrac{de(t)}{dt}\right)$	$K_р$, $T_{из}$, $T_{пд}$
Д-управляющее устройство (дифференциатор)	$W_д(p)=\dfrac{K_д T_д p}{T_д p+1}$	$T_д\dot{u}+u(t)=K_д T_д\dfrac{de(t)}{dt}$	$K_д$, $T_д$

Определяют критическое усиление регулятора $K_р=K_{кр}$ и период колебаний $T_к$ на выходе регулятора. Затем приближённые значения параметров находятся в соответствии с рекомендациями табл. 2.2. Здесь предполагается, что передаточная функция объекта может быть представлена в виде

$$W_о(p)=\frac{K_о}{T_о(p)+1}e^{-p\tau_о}, \tag{2.3}$$

где $K_о$ – передаточный коэффициент; $T_о$ – постоянная времени; $\tau_о$ – время запаздывания.

2.2. Определение параметров регулятора по методике колебаний

Закон регулирования	Значение параметров настройки
П	$K_р = 0{,}5\,K_{кр}$
ПИ	$K_р = 0{,}45\,K_{кр}$; $T_{из} = 0{,}85\,T_к$
ПИД	$K_р = 0{,}6\,K_{кр}$; $T_{из} = 0{,}5\,T_к$; $T_{пв} = 0{,}5\,T_к$

Другая методика основана на исследовании переходной функции объекта $h(t)$ и аппроксимации её моделью (2.3). Для этого по кривой разгона проводят касательную в точке перегиба, которой соответствует "тангенс максимального наклона" и вычисляют параметры модели объекта

$$K_о = \frac{y_\infty - y(t_0)}{\Delta u},\ \tau_о = t_1 - t_0,\ T_о = t_2 - t_1\,; \tag{2.4}$$

здесь Δu – величина ступенчатого воздействия, которая берётся в пределах 10…20 % от максимального значения.

В зависимости от полученных значений параметров объекта определяются настройки регуляторов в соответствии с рекомендациями табл. 2.3.

При настройке ПИД-регулятора надо учитывать, что интегриральная составляющая (И) позволяет обеспечить нулевую ошибку слежения, однако вследствие увеличения фазового сдвига её действие имеет тенденцию к дестабилизации. Дифференцирующая составляющая (Д) придает регулятору прогнозирующее свойство. За счет того, что управляющее действие пропорционально скорости изменения ошибки, обеспечивается стабилизирующий эффект, однако это может приводить к большим управляющим сигналам.

2.3. Определение параметров настройки регулятора на основе переходной функции объекта

Закон регулирования	Значение параметров настройки
П	$K_р = \dfrac{T_о}{K_о\tau_0}$
ПИ	$K_р = 0{,}9\dfrac{T_о}{K_о\tau_0}$; $T_{из} = 3\tau_о$
ПИД	$K_р = 1{,}2\dfrac{T_о}{K_о\tau_0}$; $T_{из} = 2\tau_о$; $T_{пв} = 0{,}5\tau_о$

Необходимо отметить, что получаемые параметры настройки с использованием рекомендаций табл. 2.2 и табл. 2.3 следует рассматривать как начальные значения, которые в последующем требуют уточнения.

Лабораторная работа 3

СТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: получить навыки в определении параметров настройки системы автоматического регулирования с пропорциональным регулятором.

Последовательность выполнения работы

1. Освоить теоретические положения о синтезе систем автоматического регулирования, приведённые в методических указаниях.
2. Составить структурную схему системы автоматического регулирования (САР) с пропорциональным регулятором.
3. Записать параметры модели динамики объекта с численными значениями параметров, полученными при выполнении лабораторной работы 2.

4. Определить параметр настройки пропорционального регулятора, рассчитать и построить график переходного процесса.
5. Записать передаточную функцию САР с пропорциональным регулятором и численными значениями коэффициентов.
6. Получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.
7. Включить лабораторную установку, реализовать схему САР с пропорциональным регулятором при выбранном параметре настройки.
8. Испытать работу САР с пропорциональным регулятором. Зарегистрировать данные переходных процессов, построить графики и сделать выводы.

Содержание отчёта

1. Краткие теоретические положения о синтезе системы автоматического регулирования, приведённые в методических указаниях.
2. Структурная схема САР с пропорциональным регулятором.
3. Модель динамики объекта.
4. Расчёт параметра настройки пропорционального регулятора.
5. Передаточная функция САР с пропорциональным регулятором.
6. Аналитическое выражение переходного процесса.
7. Расчётные данные и график переходного процесса с выбранным параметром настройки.
8. Графики переходных процессов, полученные в результате реализации САР.
9. Выводы по работе.
10. Список используемой литературы.

Лабораторная работа 4

АСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: получить навыки в определении параметров настройки САР с пропорционально-интегральным регулятором.

Последовательность выполнения работы

1. Освоить теоретические положения о синтезе систем автоматического регулирования, приведённые в методических указаниях.
2. Составить структурную схему САР пропорционально-интегральным регулятором.
3. Записать параметры модели динамики объекта с численными значениями параметров.
4. Определить параметры настройки пропорционально-интегрального регулятора, рассчитать и построить график переходного процесса.
5. Записать передаточную функцию САР с пропорционально-интегральным регулятором и численными значениями коэффициентов.
6. Получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.
7. Включить лабораторную установку, реализовать схему САР с пропорционально-интегральным регулятором, при выбранных параметрах настройки.
8. Испытать работу системы с пропорционально-интегральным регулятором. Зарегистрировать данные переходных процессов, построить графики и сделать выводы.

Содержание отчёта

1. Краткие теоретические положения о синтезе системы автоматического регулирования, приведённые в методических указаниях.
2. Структурная схема САР с пропорционально-интегральным регулятором.
3. Модель динамики объекта.
4. Расчёт параметров настройки пропорционально-интегрального регулятора.
5. Передаточная функция САР с пропорционально-интегральным регулятором.
6. Аналитическое выражение переходного процесса.
7. Расчётные данные и график переходного процесса с выбранными параметрами настройки.
8. Графики переходных процессов, полученные в результате реализации САР.
9. Выводы по работе.
10. Список используемой литературы.

3. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Основными задачами анализа САУ являются: анализ устойчивости системы; исследование поведения системы в переходном режиме и определение переходных динамических ошибок; анализ точности системы в установившемся состоянии.

Обычно для определения понятий устойчивости используется конечномерное евклидово пространство состояний R^n и запись движения системы в виде дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши

$$\dot{z}_i = f_i(z_1,\ z_2,\ \ldots,\ z_n,\ t),\quad i = \overline{1, n}, \tag{3.1}$$

или для линейной САУ

$$\dot{z} = Az(t),\quad z = (z_1,\ z_2, \ldots,\ z_n)^{\text{т}}; \tag{3.2}$$

здесь z – вектор фазовых координат.

В пространстве R^n выделяется множество (область) $G_0 \subset R^n$ начальных состояний $z(t_0)$ и множество $G_{\text{к}}$ конечных состояний. Последнее обычно задаётся в пространстве R^n и времени. Элементы $G_{\text{к}}$ могут состоять как из одной точки z (начала координат), так и удовлетворять уравнению процесса вида (3.1). Множество $G_{\text{к}}$ называют множеством невозмущённых состояний (невозмущённых движений или процессов), а G_0 – "областью притяжения". Движение, начавшееся при $z(t_0) \in G_0$, с течением времени попадает в $G_{\text{к}}$. Множество невозмущённых движений $G_{\text{к}}$ называется асимптотически устойчивым с областью притяжения G_0, если всякое движение, начавшееся при $z(t_0) \in G_0$, в силу свойств оператора системы с течением времени приходит в сколь угодно малую окрестность $G_{\text{к}}$.

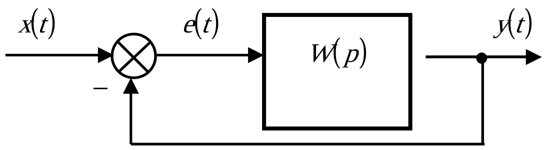


Рис. 3.1. Система с обратной связью

Дифференциальное уравнение замкнутой САУ может быть записано в виде

$$\sum_{\nu=0}^{n} a_\nu y^{(\nu)} = \sum_{\nu=0}^{m} b_\nu x^{(\nu)},\quad m < n, \tag{3.3}$$

где $y^{(\nu)}$, $x^{(\nu)}$ – соответственно ν-е производные входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ переменных; a_ν и b_ν – коэффициенты уравнения.

Устойчивость системы определяется значениями корней характеристического уравнения

$$B(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_0 = 0, \tag{3.4}$$

где p – комплексная величина.

Чтобы линейная стационарная система была устойчивой, все корни её характеристического уравнения (3.4) (полюса передаточной функции) должны располагаться в левой половине комплексной p-плоскости (рис. 3.2). Если отдельные полюса передаточной функции находятся в правой полуплоскости, то система будет неустойчивой. В случае, когда имеются корни характеристического уравнения, расположенные на мнимой оси, а все остальные корни в левой полуплоскости, то выходная переменная $y(t)$ будет иметь вид незатухающих колебаний при ограниченном входе. Такая система находится на границе устойчивости.

Анализ устойчивости можно производить без вычисления корней характеристического уравнения системы. Правила, позволяющие делать выводы об устойчивости системы без вычисления корней характеристического уравнения, называются *критериями устойчивости*. Наиболее широкое применение находят алгебраические и частотные критерии устойчивости.

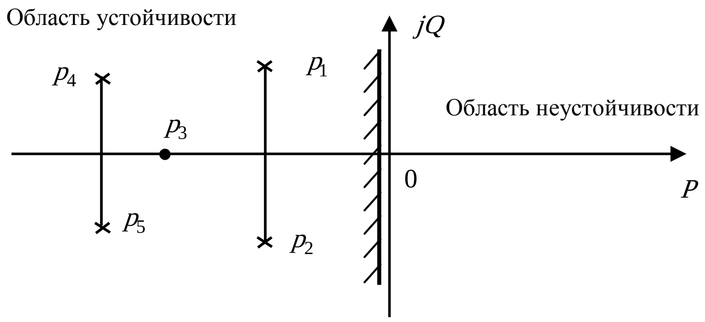


Рис. 3.2. Комплексная плоскость

Критерии, которые позволяют определить, устойчива ли система, с помощью только алгебраических процедур над коэффициентами характеристического уравнения, называют алгебраическими.

Критерий Гурвица. Для применения данного критерия составляется $n \times n$ матрица из коэффициентов характеристического уравнения. По главной диагонали в матрице размещаются элементы $a_1, a_2, ..., a_n$. Затем столбцы матрицы дополняются снизу и сверху коэффициентами следующим образом:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\vdots\vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}. \tag{3.5}$$

Если индекс коэффициента меньше нуля или больше n, а также при отсутствии данного коэффициента в характеристическом уравнении, на соответствующее место в матрице (3.5) записывается нуль.

Критерий Гурвица формулируется следующим образом: для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы выполнялось неравенство $a_0 > 0$ и определители Гурвица $\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_n$ были положительны. Для характеристических уравнений с большим n порядок определителей возрастает, и практическое вычисление их обычным путём становится громоздким. В этих случаях можно использовать необходимое (но недостаточное) условие устойчивости, которое заключается в том, что в случае уравнения n-го порядка все коэффициенты $a_n, a_{n-1}, \ldots, a_0$ должны быть положительны и ни один из них не должен равняться нулю.

Используя критерий Гурвица, запишем условия устойчивости для систем с $n = 2{,}3$.

Пусть $B(p) = a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$; т.е. $n = 2$, тогда система устойчива, если $a_0 > 0;\ \Delta_1 = a_1 > 0,\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 > 0$; или $a_0 > 0,\ a_1 > 0,\ a_2 > 0$.

Для случая $n = 3$, т.е. $B(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$ из рассмотрения определителей Гурвица

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}$$

следует, что условия устойчивости имеют вид:

$$a_0 > 0,\ a_1 > 0,\ a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0,\ a_3 > 0.$$

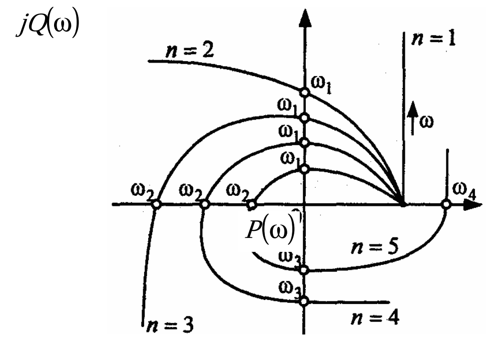
Система находится на границе устойчивости, если определители Гурвица $\Delta_1, ..., \Delta_{n-1}$ положительны, а главный определитель a_n, Δ_{n-1} равен нулю.

Широкое распространение на практике получили частотные критерии устойчивости, которые позволяют обойтись без вычисления корней характеристического уравнения. В этих критериях исследуется уравнение характеристической кривой, получающейся заменой в полиноме $B(p)$ параметр p на $j\omega$, т.е.

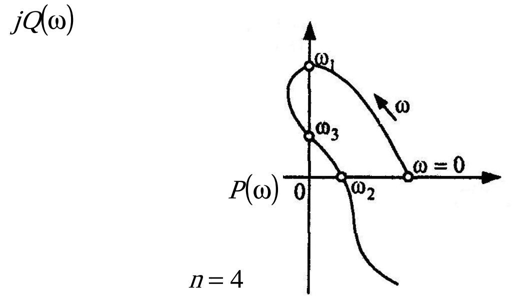
$$
\begin{aligned}
&B(j\omega) = a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \ldots + a_1(j\omega) + a_0 = P(\omega) + jQ(\omega),\\
&P(\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \ldots;\ \ Q(\omega) = a_1\omega - a_3\omega^3 + a_5\omega^5 - \ldots\ .
\end{aligned}
\tag{3.6}
$$

Критерий Михайлова. В соответствии с данным критерием САУ будет устойчивой, если при возрастании частоты ω от 0 до ∞ вектор $B(j\omega)$ повернется на угол $n\pi/2$. Другими словами, САУ устойчива, если годограф вектора $B(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ последовательно обходит n квадрантов в положительном направлении (против часовой стрелки).

Примеры годографов для устойчивых систем с $n=1,\ n=2, \ldots,\ n=5$ показаны на рис. 3.3, *а*. Так, при $n=2$ изменение аргумента равно π и годограф проходит через два квадранта. Годограф неустойчивой системы с $n=4$ приведен на рис. 3.3, *б*. Система находится на границе устойчивости, если её годограф пересекает начало координат, обходя при этом $n-1$ квадрантов. Здесь частота ω является одновременно корнем уравнений $P(\omega)=0$ и $Q(\omega)=0$.



а)



б)

Рис. 3.3. Годографы:

а – для устойчивых систем ($n=\overline{1,\,5}$); *б* – для неустойчивой системы

Критерий Найквиста (Найквиста-Михайлова или амплитудно-фазовый критерий устойчивости). Данный критерий позволяет делать вывод об устойчивости САУ с обратной связью на основе рассмотрения частотных характеристик разомкнутой системы.

Для разомкнутой САУ критерий формулируется следующим образом: САУ с включенной обратной связью будет устойчивой, если АФХ разомкнутой системы $W_{\text{раз}}(j\omega)$ при возрастании частоты ω от 0 до ∞ не охватывает точки с координатами $(-1,\ j0)$ (рис. 3.4, *а*, *б*). Заметим, что случай, представленный на рис. 3.4, *а* соответствует абсолютной устойчивости, а на рис. 3.4, *б* – относительной. Относительно устойчивая система при уменьшении передаточного коэффициента может стать неустойчивой. Если годограф проходит через точку $(-1,\ j0)$ (рис. 3.4, *в*), то система находится на границе устойчивости, и если АФХ $W_{\text{раз}}(j\omega)$ охватывает точку $(-1,\ j0)$, то замкнутая САУ будет неустойчива (рис. 3.4, *г*).

В случае многоконтурных САУ с местными обратными связями и систем, содержащих неустойчивые звенья, разомкнутая система может быть неустойчивой. Здесь замкнутая САУ будет устойчивой, если АФХ

$W_{раз}(j\omega)$ охватывает точку $(-1,\ j0)$ в положительном направлении $n_1/2$ раз, где n_1 – число корней характеристического уравнения с положительной вещественной частью для разомкнутой системы. За положительное направление принимается переход $W_{раз}(j\omega)$ из верхней полуплоскости в нижнюю при возрастании ω, переход из нижней полуплоскости в верхнюю считается отрицательным.

Важным достоинством критерия Найквиста-Михайлова является то, что он может применяться для исследования устойчивости по экспериментально полученным АФХ разомкнутой САУ или её звеньев, а также делать оценки по качеству переходных процессов.

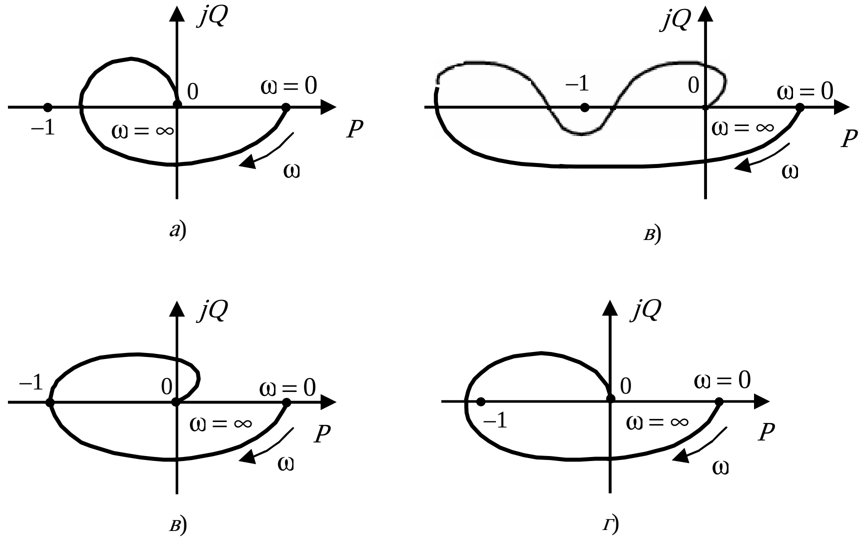


Рис. 3.4 Годографы разомкнутой САУ для устойчивой системы:
а, б – в замкнутом состоянии; *в* – на границе устойчивости; *г* – неустойчивой

Для обеспечения работоспособности САУ в процессе эксплуатации важную роль играет создание при проектировании системы требуемого запаса устойчивости. Этот запас может оцениваться с использованием частотных и переходных характеристик.

Показатели запаса устойчивости по модулю и фазе, получаемые из рассмотрения годографа $W_{раз}(j\omega)$ разомкнутой системы относительно критической точки $(-1,\ j0)$ приведены на рис. 3.5, *а*. *Запасом устойчивости по модулю* называется минимальный отрезок действительной оси h, характеризующий расстояние между критической и ближайшей точкой пересечения годографа $W_{раз}(j\omega)$ с действительной осью (точка *1*), а минимальный угол γ, образуемый радиусом, проходящим через точку *2* пересечения годографа $W_{раз}(j\omega)$ с окружностью единичного радиуса и отрицательной частью оси $P(j\omega)$, называют *запасом устойчивости по фазе*.

Система обладает требуемым запасом устойчивости по модулю h и фазе γ, если годограф $W_{раз}(j\omega)$ не заходит в заштрихованную область, выделенную на рис. 3.5, *б*, огибая ее снизу.

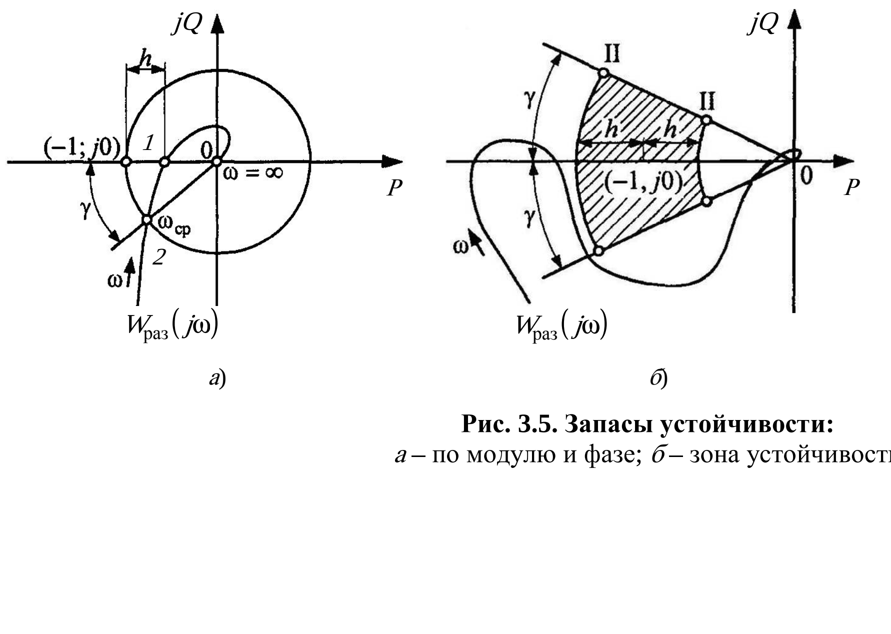


Рис. 3.5. Запасы устойчивости:
а – по модулю и фазе; *б* – зона устойчивости

Для определения запаса устойчивости САУ может использоваться также переходная характеристика $y(t)$, получаемая при отработке скачкообразного входного воздействия. Если переходной процесс колебательный, то запас устойчивости характеризуется показателем σ, который называется перерегулированием. Перерегулирование рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\,;$$

здесь предполагается, что установившееся значение $y(\infty)$ после завершения переходного процесса отлично от нуля.

Допустимое значение перерегулирования для САУ устанавливается на основе опыта эксплуатации подобных систем. Обычно считается, что запас устойчивости достаточен, если величина σ не более 10…30 %. Дополнительно к величине перерегулирования может задаваться допустимое число колебаний за время переходного процесса, оно не должно превышать 1–3.

При анализе качества работы САУ с обратной связью, в которой выходная величина $y(t)$ должна по возможности мало отличаться от входной $x(t) = y_{\text{зад}}(t)$, обычно используются тестовые (типовые) входные воздействия, наиболее неблагоприятные для системы. Если для тестового входного сигнала выходной сигнал удовлетворяет требуемым условиям, то с большей вероятностью можно предполагать, что $y(t)$ будет соответствовать этим условиям и при других воздействиях. Наиболее часто в качестве тестовых сигналов используются ступенчатая функция, дельта-функция и другие, приведенные на рис. 3.6.

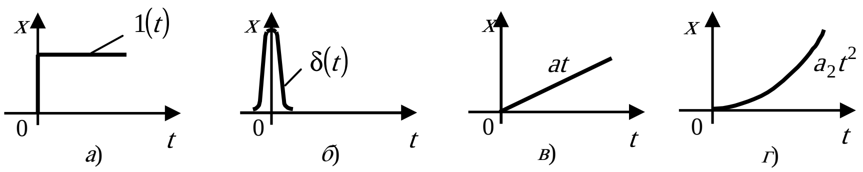


Рис. 3.6. Тестовые входные воздействия:
а – ступенчатая функция; *б* – дельта-функция;
в – линейная функция; *г* – квадратичная функция

Качество работы САУ оценивается с помощью критериев, которые можно разбить на четыре группы:

1) критерии точности, характеризующие величину ошибки между требуемым и действительным значением регулируемой величины в различных режимах работы;

2) критерии, характеризующие быстродействие системы, т.е. насколько быстро САУ отрабатывает управляющие и возмущающие воздействия;

3) критерии, определяющие величину запаса устойчивости;

4) комплексные критерии, оценивающие обобщённые свойства, например, точность и запас устойчивости.

Важными показателями качества управления в динамических режимах являются быстродействие системы, величина перерегулирования, число колебаний в течение переходного процесса, время запаздывания и время нарастания.

Быстродействие системы определяется *длительностью переходного процесса* $t_{\text{п}}$. За время $t_{\text{п}}$ принимается временной интервал от момента подачи на вход $x(t) = 1(t)$ до момента, после которого выполняется неравенство

$$|y(t) - y(\infty)| \le \Delta y,$$

где Δy – допустимая ошибка в установившемся состоянии. В качестве ошибки Δy для следящих систем берут 1…5 % от величины скачка на входе.

Наряду с рассмотренными показателями качества на практике широко используются интегральные оценки

$$I_0 = \int_0^\infty \Delta y(t)\,dt\,;\; I_1 = \int_0^\infty |\Delta y(t)|\,dt\,;\; I_2 = \int_0^\infty \Delta y^2(t)\,dt\,;$$

здесь $\Delta y(t)$ – отклонение $y(t)$ от установившегося значения после окончания переходного процесса.

Для обобщённой характеристики качества переходного процесса, комплексно учитывающей время $t_{\text{п}}$, перерегулирование σ и величину установившегося значения $y(\infty)$, используется область допустимых отклонений $y(t)$ в переходном режиме.

В ряде случаев требования к качеству переходного процесса задаются с помощью времен запаздывания $t_з$ и нарастания $t_н$, которые определяются с использованием соответственно значений 0,5 и 1 относительной выходной величины $y(t)/y(\infty)$.

Лабораторная работа 5

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: получение навыков в оценке показателей качества работы системы автоматического регулирования.

Последовательность выполнения работы

1. Освоить теоретические положения об анализе качества САР, приведённые в методических указаниях.
2. Используя результаты лабораторной работы 4, определить характеристики качества переходного процесса – длительность переходного процесса $t_п$, перерегулирование σ и величину ошибки в установившемся состоянии.
3. Проверить выполнение требований качества работы САР (сравнить с допустимыми значениями).
4. Определить параметры настройки, при которых требования к качеству работы САР выполняются.
5. Проверить работу САР при уточнённых параметрах настройки.

Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Краткие сведения о частных и обобщённых характеристиках качества переходного процесса САР.
3. Расчёт показателей качества переходного процесса при параметрах настройки, полученных в лабораторной работе 4.
4. Расчёт параметров настройки, при которых требования к качеству работы САР выполняются.
5. График переходного процесса и область допустимых отклонений $y(t)$ при уточнённых параметрах настройки.
6. Выводы по работе.
7. Список используемой литературы.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: получение навыков в исследовании устойчивости САР с использованием частотного критерия (критерия Найквиста, Михайлова).

Последовательность выполнения работы

1. Освоить теоретические положения об устойчивости САР, приведённые в методических указаниях.
2. По заданной структурной схеме системы с пропорционально-интегральным регулятором записать передаточную функцию для разомкнутой САР.
3. По полученной передаточной функции записать частотную характеристику САР в разомкнутом состоянии.
4. Построить график (годограф) АФЧХ разомкнутой САР, используя параметры модели динамики объекта и пропорционально-интегрального регулятора.
5. Определить показатели запаса устойчивости по модулю и фазе, а также перерегулирование по данным лабораторной работы 5.

Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Исходные данные (параметры модели динамики объекта и параметры настройки пропорционально-интегрального регулятора).
3. Краткие сведения о критериях, используемых при исследовании устойчивости САР.
4. Выражение для передаточной функции и АФХ разомкнутой САР.
5. Расчётные данные и график годографа АФХ разомкнутой САР.
6. Результаты оценки показателей запаса устойчивости.
6. Выводы по работе.
7. Список используемой литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2004. – 752 с.

2 Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 5-и т. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.

3. Коновалов, Г.Ф. Радиоавтоматика : учебник для вузов по спец. "Радиотехника" / Г.Ф. Коновалов. – М. : Высшая школа, 1990. – 335 с.

4. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.

5. Муромцев, Ю.Л. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – Ч. 1. –96 с.

6. Муромцев, Д.Ю. Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами : монография / Д.Ю. Муромцев. – Тамбов-М.-СПб.-Баку-Вена : Изд-во Нобелистика, 2005. – 202 с.

СОДЕРЖАНИЕ